

Ilari Stenroos

# CLT-tilaelementtien käyttö asuinkerrostalojen ullakoiden lisärakentamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

22.04.2015

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Ilari Stenroos CLT-tilaelementtien käyttö asuinkerrostalojen ullakoiden lisärakentamisessa 57 sivua + 10 liitettä 22.04.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Nuorempi rakennesuunnittelija Arto Hokkanen Ryhmäpäällikkö Heikki Aronen Lehtori Jouni Kalliomäki
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia CLT-levyistä koottujen tilaelementtien käyttömahdollisuuksia 1920 – 1950 -luvulla rakennettujen asuinkerrostalojen käyttöullakoiden lisärakentamisessa. Tilaelementtien tarkoituksena on lyhentää rakennusaikaa, jolloin vesikaton aukioloaika lyhenee ja siten myös aika, jona rakenteet ovat alttiina kosteusvaurioille.</p> <p>CLT-levyt ovat 60 mm – 400 mm paksuja massiivipuisia levyjä, jotka koostuvat ristikkäin liimatuista kerroksista, josta tulee nimi CLT – <i>Cross Laminated Timber</i>. Opinnäytetyössä tarkasteltiin aluksi tilaelementtien käyttömahdollisuuksia ullakkorakentamisessa yleensä, eli esimerkiksi ulkomittojen ja -muotojen sekä tuentamahdollisuuksien mukaan. Työssä tutkittiin uusien kantavien rakenteiden sijoittamista vanhaan runkoon, kun yläpohjatyypinä on 1920 – 1950 -luvulla paljon käytetty alalaattapalkisto. Yhtenä suurimpana osana työhön kuului myös CLT-rakenteiden vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan tutkiminen, jonka tuloksia apuna käyttäen luotiin eri vaipparakennetyyppejä rakennetyypikirjastoon. Lisäksi työhön kuului palomääräysten asettamien suojaverhousvaatimusten selvittäminen sekä CLT-rakenteiden mitoituksen perusteiden tutkiminen.</p> <p>Selvitystyöstä ilmeni, että CLT-tilaelementtien hyödyntäminen ullakkorakentamisessa on mahdollista, mutta yleisesti tilaelementtien käyttömahdollisuuksia rajaa esimerkiksi ullakon kattokorkeus, joka on usein enemmän mitä tilaelementtien suositeltu kokonaiskorkeus on. Itse CLT:n käytölle rakennustarvikkeena ei selvitystyössä löytynyt esteitä. CLT:llä on paljon hyviä ominaisuuksia, joista on hyötyä tilaelementtirakentamisen kannalta. Tällaisia ovat esimerkiksi levyn korkea jäykkyys, keveys ja ilmatiiveys.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli myös tuottaa yritykselle lyhyt suunnitteluohje sekä rakennedetalji- ja rakennetyypikirjasto. Lisäksi opinnäytetyössä tehtiin tilaelementtejä kantavien uusien teräspalkkien nopea alkumitoitustaulukko. Taulukon avulla voi tehdä hankesuunnittelua varten karkean arvion tarvittavasta teräspalkin koosta palkkien jännevälin ja jakovälin perusteella.</p> <p>Koska selvitystyössä ei tullut vastaan asioita, jotka estäisivät CLT-tilaelementtien käytön ullakoiden lisärakentamisessa, voidaan sitä pitää vaihtoehtoisena rakennustapana yrityksen tulevaisuudessa ullakon lisärakentamiskohteissa. Lisäksi työ antaa karkeitä ohjeita ullakon CLT-tilaelementtien suunnitteluun.</p>	
Avainsanat	CLT, tilaelementti, lisärakentaminen, ullakkorakentaminen

Author(s) Title Number of Pages Date	Ilari Stenroos The use of prefabricated CLT modules in apartment building attics' additional development 57 pages + 10 appendices 22 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil engineering
Specialisation option	Structural engineering
Instructor(s)	Arto Hokkanen Heikki Aronen Jouni Kalliomäki, Senior Lecturer
<p>The aim of this thesis was to research the possibilities of CLT (cross laminated timber) modules in building additions to apartment building attics. The use of CLT modules in attic conversions is meant to shorten the time that the roof is open and vulnerable to dampness.</p> <p>CLT slabs are 60 – 400 mm thick solid wood slabs that are made of 3 to 7 cross laminated layers. This thesis deals first with the use of modular units generally in attic conversions, for example, how the shape of the building, its dimensions and the position of the present supporting structures affect the attics' construction method. Then the placing of new supporting beams between the old concrete beams was studied in the case where the old floor structure is beam-and-slab floor, one of the most common structures used between the 1920s and 1950s. One of the major themes in this thesis was analyzing the thermal and hygrothermal performance of CLT structures and clarifying the demands of fire protection.</p> <p>The survey revealed that the use of CLT modules in building additions in attics has a lot of potential but there are many things that might limit the possibilities of the use of any modular units. For example, the total height of the module can easily rise over the recommended maximum height. This thesis didn't reveal any obstacles that could prevent using CLT as attic's frame material. CLT has many features that are useful in modular building. For example, CLT has very high stiffness and at the same time it is very light.</p> <p>One of the main purposes of this thesis was to produce short design guidelines for the use of CLT -structures in attics and plan some usual structural details and different types of CLT roofs and walls. Also a raw dimensioning table for the steel beams that bear the CLT modules was produced. The table is useful in the project planning phase when the estimates for the sizes of steel beams are needed.</p> <p>The results of this thesis enable Optiplan Oy to use CLT -modules as alternative construction method in attics' addition building. This thesis offers also some approximate guidelines for dimensioning CLT elements.</p>	
Keywords	CLT, solid wood structures, modular building, attic room, building additions

## Sisällys

### Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Asuinkerrostalot 1920 – 1950 -luvuilla	2
2.1	Väli- ja yläpohjat	2
2.2	Seinät ja pilarit	3
3	Ullakoiden lisärakentamista rajoittavat määräykset, ohjeet ja ongelmat	4
3.1	Suomen rakentamismääräyskokoelma ja rakennusvalvontavirasto	4
3.2	Talotekniikan ja rakennusrungon asettamat rajoitukset	5
4	Tilaelementit	6
4.1	Tilaelementit kerrostalorakentamisessa	6
4.2	Tilaelementit ullakkorakentamisessa	7
5	CLT-tilaelementit	8
5.1	CLT-levyjen rakenne	8
5.2	Ääneneristävyys	9
5.3	Lämmöneristävyys ja kosteustekninen toiminta	12
5.4	Palonkesto ja palomääräykset	15
5.4.1	CLT-levyn palonkesto	15
5.4.2	Suojaverhoukset ja rakennustarvikkeiden luokat	16
5.4.3	CLT-levyjen suojaverhoukset	17
5.4.4	Automaattinen alkusammutus	19
6	Rakennetyyppien tutkiminen	20
6.1	Tutkimusmenetelmä ja tutkittavat rakennetyypit	20
6.2	Ulkoseinät	20
6.3	Yläpohja	24
7	Detaljit ja suunnitteluohje	26
7.1	Yleistä	26
7.2	Palokatkot	26
7.3	Välipohja	28
7.4	Kantavat ja jäykistävät seinät	29

7.5	Yläpohja	32
7.6	Uudet kantavat teräspalkit	35
7.7	CLT-rakenteiden mitoittaminen	38
7.7.1	Yleistä mitoituksesta	38
7.7.2	Laattojen mitoittaminen	41
7.7.3	Palkkien mitoitus	49
7.7.4	Seinäelementin mitoitus	50
8	Yhteenveto	52
	Lähteet	55
	Liitteet	
	Liite 1. Mallikohteen tasokuvat ja leikkaukset	
	Liite 2. Ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusjakaumien laskenta	
	Liite 3. Rakennusfysiikan kaavakokoelma	
	Liite 4. CLT-levyn kosteudenläpäisyvastuksen laskenta	
	Liite 5. Sturenkadun mallikohteen ullakon leikkaus	
	Liite 6. CLT-lattialevyn mitoitus esimerkki	
	Liite 7. CLT-palkin mitoitus esimerkki	
	Liite 8. CLT-seinälevyn mitoitus esimerkki	
	Liite 9. Välipohjan uudet teräspalkit	
	Liite 10. CLT-palokatko holkin leikkauspiirustus	

## Lyhenteet ja käsitteet

**Askelääni** Askelääni syntyy nimensä mukaisesti kävelystä. Äskeläänen voimakkuuden vaikuttaa lattian pintamateriaalin kovuus. Esimerkiksi parketilla kävely tuottaa voimakkaamman äänen kuin muovimatolla kävely.

**CLT** ”Cross-laminated timber”, eli massiivipuinen rakennusmateriaali, joka on valmistettu ristikkäin liimatuista puulevykerroksista, eli lamelleista. Lamellit liimataan kuusi-, mänty- tai pihtalaudoista.

### Ilmanvuotoluku

Ilmanvuotoluku  $q_{50}$  kertoo, kuinka monta kertaa ilma vaihtuu ulkovaipan vuotokohtien läpi tunnissa vaipan pinta-alaan nähden, kun paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä on 50 Pa. Määräysten enimmäisarvo on  $q_{50} = 4,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$  ja erinomaisen tiiveyden raja-arvona pidetään  $q_{50} = 0,5 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ .

**Ilmääni** Ilmääni on ilmassa kulkeva ääniaalto, joka aiheutuu esimerkiksi puheesta.

**Massalaki** Mitä tiheämpi materiaali on, sitä paremmin se eristää ääntä. Eli kun ääniaalto kohtaa rakenteen, syntyy rakenteessa värähtelyä. Mitä enemmän rakenne värähtelee, sitä enemmän se synnyttää ääntä rakenteen toiselle puolelle. Kevyt rakenne siis värähtelee samasta äänenpaineesta enemmän kuin raskas rakenne.

**Passiivitalo** Passiivitaloksi kutsutaan rakennusta, jonka lämmitysenergian kulutus on niin pieni, että kaikki tai lähes kaikki tarvittava lämpöenergia saadaan aurinkoenergiaa ja rakennuksen käytön aiheuttamaa energiaa hyödyntämällä.

**Runkoääni** Runkoäänellä tarkoitetaan ääntä, joka kulkeutuu rakenteita pitkin mekaanisena värähtelynä aiheuttaen ilmääntä. Tyypillisiä runkoääniä syntyy esimerkiksi pyykinpesukoneesta ja pianosta.

## Tilaelementti

Tehdasolosuhteissa kasattu rakennuselementti, joka käsittää vähintään valmiin ylä- ja alapohjan sekä päätyseinät.

## 1 Johdanto

Vanhojen asuinkerrostalojen ullakkotiloja on muutettu säilytystiloista asuinkäyttöön jo useampien vuosien ajan. Perinteisesti työ vaatii paljon vanhojen rakenteiden purkua ja uusien rakenteiden rakentamista pitkälti paikalla rakentamalla. Käsityönä tehtynä rakentaminen vie paljon aikaa, jolloin vesikatto on auki pitkän aikaa ja alttiina kosteudelle. Samalla uusien puukerrostalojen rakentaminen CLT-tilaelementeistä on kasvamassa. CLT-tilaelementit ovat kevyitä mutta samalla myös lujia ja jäykkiä, joten niiden käyttö ullakkojen lisärakentamisessa on varteenotettava vaihtoehto. Lisäksi ullakkorakentamisessa saavutettaisiin tällöin tilaelementtirakentamisen hyödyt, kuten rakenteiden ja asennusten laatu.

Tässä opinnäytetyössä CLT-tilaelementtien ja niiden tuentojen suunnittelun pohjana on käytetty olemassa olevaa asuinkerrostaloa, jonka kantavat väli- ja ulkoseinät ovat tiilestä muurattuja ja yläpohjana on teräsbetoninen alalaattapalkisto. Kantavat pystyrakenteet eivät aseta rajoituksia tässä opinnäytetyössä esitettyihin ratkaisuihin, mutta yläpohjan rakenteella on vaikutusta esimerkiksi uusien kantavien rakenteiden sijoitteluun. Siksi tässä opinnäytetyössä esitetyt ratkaisut esimerkiksi uusien kantavien teräspalkkien sijoittelussa ja tuennoissa eivät ole yleisesti päteviä kaikissa yläpohjarakenteissa, mutta se ei kuitenkaan välttämättä estä CLT-tilaelementtien käyttöä. Mahdollisuudet CLT-tilaelementtien käyttöön ullakon lisärakentamisessa tulisi tutkia aina tapauskohtaisesti.

Tässä opinnäytetyössä selvitetään kirjallisuutta tutkimalla CLT-tilaelementtien yleisiä suunnitteluperusteita ja -ohjeita, joita käytetään lähtötietona CLT-tilaelementtien suunnittelussa ullakolle aiemmin mainitun olemassa olevan kohteen lähtötietojen mukaan. Lisäksi selvitetään yleensä massiivipuukurakentamisessa huomioitavia asioita, kuten palosuojaverhoukset sekä tutkitaan CLT-rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä laskennallisilla menetelmin. Selvitystyön tuloksena tehdään rakennedetalji- ja rakennetyyppikirjastot sekä lyhyt kirjallinen suunnitteluohje, joita yritys voi hyödyntää mahdollisesti tulevissa ullakkorakentamisprojekteissa. Osana suunnitteluohjetta työssä myös selvitetään CLT-rakenteiden mitoituksen perusteita.

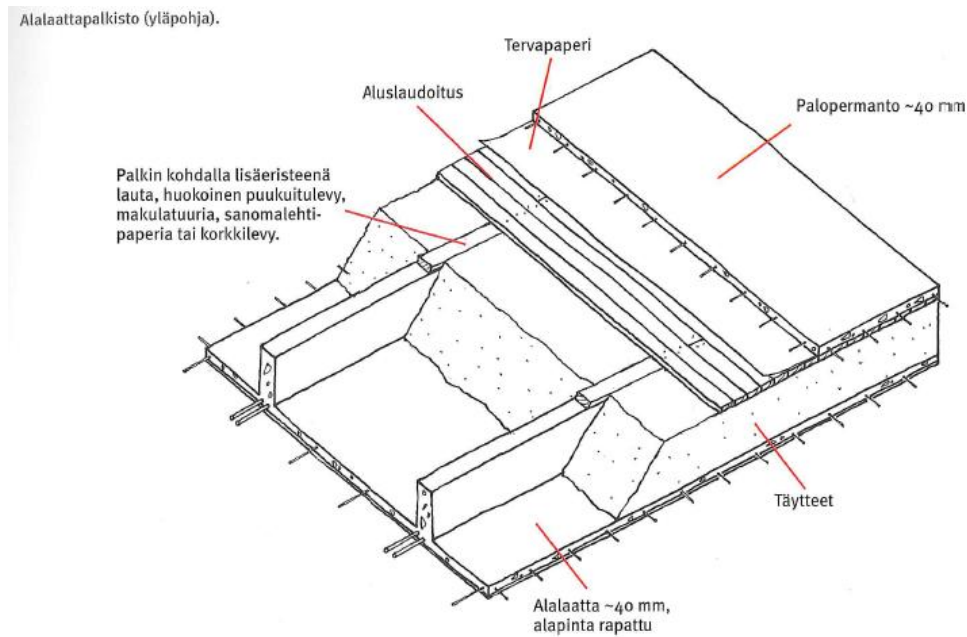
Tämä tutkimus tehdään kokonaissuunnittelutoimisto Optiplan Oy:lle, joka on osa kansainvälistä NCC-konsernia. Optiplan Oy käsittää asunusuunnittelun, toimitilasuunnitte-

lun ja korjausrakentamisen toimialat. Toimialoihin sisältyvät arkkitehti-, rakenne-, LVIA-, sähkö- ja energiasuunnittelu. Tämä selvitys tehdään korjausrakentamispalvelun rakennesuunnittelupuolelle, jolle on jo kertynyt aiempaa kokemusta ullakkorakentamisen haasteista.

## **2 Asuinkerrostalot 1920 – 1950 -luvuilla**

### **2.1 Väli- ja yläpohjat**

Asuinkerrostalojen runkomateriaalina käytettiin 1800-luvulta noin 1950-luvulle asti pääosin tiiltä. Väli- ja yläpohjamateriaali oli noin 1920-luvulle asti useimmiten puuta. Noin 1910 alkoi väli- ja yläpohjien kantavana rakenteena yleistyä teräsbetonipalkisto, yleisimmin niin sanottu alalaattapalkisto. Kuten myös kuvassa 1 esitetään, alalaattapalkistossa itse teräsbetonipalkkien välille on valettu niiden alapinnat yhdistävä noin 40 mm paksu teräsbetonilaatta. Palkkien väleissä on yleensä täytteenä esimerkiksi sammalta, sahanpurua ja rakennusjätettä. Palkkien yläpinnassa on usein puukoolaus ja lattialaudoitus välipohjissa ja yläpohjissa laudoituksen päälle on vielä valettu palosuojaukseksi noin 40 mm paksu teräsbetonilaatta, jota kutsutaan nimellä palopermanto. Massiivinen teräsbetonilaatta alkoi yleistyä jo 1940-luvulla, mutta vasta 1950-luvun alkupuolella sitä alettiin käyttää enemmän. Tällöin rakenne toteutettiin niin sanotusti uivana laattana. Kantavan laatan päälle asennettiin ääneneriste, joka saattoi olla esimerkiksi vuorivillaa tai kovalevykorkkia. Eristekerroksen päälle valettiin 40–80 mm paksu teräsbetonilaatta. Yläpohjarakenne oli useimmiten muuten samanlainen, mutta eristekerros oli vain paksuampi. [1 s.56 – 57, 94; 2 s.52.]



Kuva 1. Alalaattapalkkisto yläpohjassa. [1.]

## 2.2 Seinät ja pilarit

Kantava runko eli ulkoseinät ja osa väliseinistä on useimmiten asuinkerrostaloissa muurattu tiilestä, mutta joissakin tapauksissa talon keskellä olevat kantavat rakenteet on tehty teräsbetonipilareista. Tällöin rungosta käytetään nimitystä sekarunko. Kellari- ja pilareissa pilarit ovat raudoittamatonta säästöbetonia ja ylimmässä kerroksessa ne saattavat olla tiiltä pienempien kuormien takia. Ulkoseinät ovat lähes poikkeuksetta tiilestä. Betonipilareiden käyttö kiellettiin muissa kuin kellari- ja pohjakerroksissa vuonna 1926. Tämä johtui Helsingin rakennustarkastuskonttorin toteamista ongelmista betonipilareiden ja tiilimuurien keskinäisestä epätasaisesta laskeutumisesta. Kiellosta johtuen ei sekarunkojärjestelmää käytetty enää 1920-luvun loppupuolella vilkkaan rakennuskauden aikana. Myöhemmin 1930-luvulla ulkoseinien muurauksessa ruvettiin käyttämään kalkkisementtillaastia, jolloin seinät eivät enää laskeutuneet samalla tavalla kuin kalkkilaastia käytettäessä. Tämän johdosta sekarunkojärjestelmä otettiin uudelleen käyttöön ja 1930-luvun loppuun mennessä se oli Helsingissä jo perinteistä tiilimuuraukseen yleisempi ratkaisu. Sekarunkojärjestelmä myös säilyi yleisimpänä runkoratkaisuna aina 1950-luvun puoliväliin saakka. [2, s.53 – 55.]

### 3 Ullakoiden lisärakentamista rajoittavat määräykset, ohjeet ja ongelmat

#### 3.1 Suomen rakentamismääräyskokoelma ja rakennusvalvontavirasto

Tässä opinnäytetyössä rakennusvalvontavirastolla tarkoitetaan vain Helsingin rakennusvalvontavirastoa, koska suurin osa tämän opinnäytetyön aiheen ja rajauksen mukaisista rakennuksista ja yrityksen kohteista sijaitsee Helsingissä. Merkittävimpiä ullakojen muuttamista asuintiloiksi rajoittavia tekijöitä tulee lähinnä asemakaavasta. Esimerkiksi yleisesti ottaen ullakkoasuntoihin liittyviä parvekkeita ei saa tehdä kadun puolelle ja usein myös kattoikkunat on sijoitettava sisäpihan puolelle. Helsingissä rakennusvalvonta myös edellyttää, että asukkaiden yhteistilat ja pihat ovat rakennusvalvonnan yhteistilaohjeen mukaisia ja viihtyisiä. Mikäli näin ei ole, tulee ne kunnostaa ullakkorakentamisen yhteydessä. Myös ullakkotilojen huonekorkeus saattaa olla rajoittava tekijä. Joissakin kohteissa ullakolle saattaa mahtua muutama huone, mutta kokonaisuudessaan huoneistolle ei välttämättä ole tilaa. Tällöin voidaan ullakkokerroksen uudet tilat liittää ylimpien kerrosten asuntoihin. Paloturvallisuuden osalta ullakkorakentaminen toteutetaan uudisrakentamisen määräyksiä noudattaen. Normaaleista uudisrakennuksista poikkeavissa ratkaisuissa ja määräysten tulkinnoissa on kuitenkin neuvotteluvaraa, joten pieniä kevennyksiä ratkaisuihin voi saada. Vanhan asuinkerrostalon ullakkoa muutettaessa asuinkäyttöön on myös hyvä tarkistaa rakennuksen muiden palokorjauksen tarve. Ullakkorakentamisen ehtona tätä ei kuitenkaan pidetä ainakaan Helsingin rakennusvalvontaviraston ullakkorakentamisohteen (lähde 20) mukaan. Pääosin lämmöneristeinä ullakolla tulisi käyttää palamatonta mineraali- tai kivivillaa. Helsingin rakennusvalvontaviraston laatimassa ullakkorakentamisen rakennustapaohjeessa sallitaan myös polyuretaanieristeiden käyttö, mutta vain paikallisesti muun muassa kattoikkunoiden osalla. Tällöinkin eristeet tulee koteloida paloturvalliseksi. Asuinkerrostalojen ullakoilla on yleensä asukkaiden varastotilaa, joten kun ullakko muutetaan asuintilaksi, tulee säilytystilat sijoittaa jonnekin muualle. [5, 6, 8, 18.]

Helsingissä on ollut 23.2.2014 asti voimassa Uudenmaan Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus ELY:n myöntämä asuinkerrostalojen ullakoiden muuttamista asuinkäyttöön koskeva poikkeamispäätös. Tämän perusteella kaupunki voi myöntää rakennusluvan ullakkoasunnolle, vaikka kohteessa ei olisi enää jäljellä asemakaavan mukaista rakennusoikeutta. Poikkeamispäätös on ollut voimassa lähes vastaavana jo vuodesta 1987 ja sitä on uusittu aina viiden vuoden välein. [7.]

Helsingin rakennusvalvonta katsoo ullakkohankkeiden olevan suunnittelukohteina yleensä erittäin vaativia. Pääsuunnittelijan pätevyyden tulee tällöin olla Suomen rakentamismääräyskokoelman osan A2 mukaisesti luokkaa AA. Useimmiten myös arkkitehdin pätevyyden on oltava luokkaa AA. Rakennesuunnittelijan pätevyyden tulee yleensä olla vähintään luokkaa A, poikkeustapauksissa AA. LVI-suunnittelijan on oltava pätevydeltään luokkaa A. [6.]

### 3.2 Talotekniikan ja rakennusrungon asettamat rajoitukset

Useimmiten ullakoille ei ole vedetty lämpö-, vesi- tai viemäriinjoja ja sähkölinjatkin saattavat olla riittämättömät. Käytännössä LVIS-linjojen toteuttaminen ullakolle vaatii usein uudet nousut kellarista asti. Sopivien paikkojen löytäminen kerrosten läpi saattaa tuottaa hankaluuksia joissakin kohteissa. Lisäksi ullakolle tulisi jäädä tilaa myös talotekniikkalaitteistolle. Esimerkiksi liitteen 1 ensimmäisellä sivulla on esitetty mallikohteen tilaelementtijako, jossa tilaelementti numero 4 on varattu kokonaan talotekniikkalaitteistolle. Joissakin vanhoissa asuinkerrostaloissa ullakolle kulku saattaa olla haastavaa; usein ullakolle johtavat portaat ovat liian jyrkät nykymääräysten mukaan. Hissin ulottamista ullakkotasolle ei ole kuitenkaan pidetty yleensä ullakkorakentamisen ehtona. Usein huonekorkeutta halutaan luonnollisesti mahdollisimman paljon, mutta rakennuksen nykyinen kattokorko ei saa juurikaan nousta. Tällöin vesikattorakenteesta tehdään mahdollisimman ohut, jolloin eristetilan tuuletuksen toimivuus on varmistettava huolella. Asuinrakennuksissa huoneistojen välisen ääneneristävyys on oltava hyvä, jonka toteuttaminen saattaa vaatia erityisratkaisuja runkoäänien takia. Mikäli ullakolle rakennetaan sisäänvedetty parveke, voi lämpimien tilojen päälle tulevien parvekkeiden vedeneristykset sekä vedenpoistojärjestelmät tuottaa haasteita. Rakennuksen muodolla voi olla myös vaikutusta ainakin rakennustapaan. Paikan päällä rakentamalla voidaan teoriassa tehdä haastavankin muotoisia rakennuksia, mutta tilaelementeistä rakennettaessa muotojen tulisi olla mahdollisimman yksinkertaiset. Tällä varmistetaan tilaelementtien istuvuus vanhan rakennuksen runkoon ja vältetään näin rakennusvirheitä. Kohteen mukaan voidaan kuitenkin soveltaa siten, että haastavan muotoiset alueet tehdään paikan päällä ja yksinkertaiset alueet toteutetaan tilaelementeistä. [8.]

## 4 Tilaelementit

### 4.1 Tilaelementit kerrostalorakentamisessa

Puukerrostalorakentaminen on Suomessa vielä melko vähäistä verrattuna moniin muihin maihin. Suomessa uusien puukerrostalojen osuus kaikkien uusien kerrostalojen tuotannosta on vain noin 3-4 %, kun vastaava luku on Ruotsissa 20 % ja Yhdysvalloissa jopa 90 %. Yhdysvalloissa suurin osa puukerrostaloista tehdään kuitenkin paikan päällä, eikä elementeistä. Suomessa Stora Enso on kehittänyt puukerrostalorakentamista CLT-levyistä muutamien vuosien ajan. Aluksi talot rakennettiin pääosin suurelementeistä, mutta nykyään tuotetaan enimmäkseen tilaelementtejä. Tilaelementtien ansiosta rakentaminen sujuu hyvin nopeasti ja rakentamisen laatu on korkeaa kuivien tehdasolosuhteiden ansiosta. Kuvassa 2 on rakenteilla Jyväskylässä sijaitseva Suomen suurin puukerrostalo Puukuokka 1, jonka rakentamiseen kului aikaa noin 11 kuukautta. Tilaelementtien rakenteiden on oltava kuljetuksen ja nostojen takia tavallista jäykempiä. Lisäksi heikkoutena voidaan pitää muutosten tekoa jälkeenpäin. Myöskään tilaelementtien sisäpintoihin, esimerkiksi lattiamateriaaleihin, ei voi tehdä enää muutoksia rakennusvaiheessa. Haittana voidaan myös pitää sitä, että puurakenteet eivät saa näkyä Suomen palomääräysten takia. Tällöin puutalon tunne ei suoranaisesti välity asukkaalle. [12, 27.]



Kuva 2. CLT-tilaelementin asentamista Jyväskylässä Suomen korkeimman puukerrostalon Puukuokan työmaalla. [<http://www.clt.info/fi/projekte/detail/>.]

Tilaelementtien yksi keskeisistä eduista on sen nopea ja helppo asennus työmaalla. Uudisrakennusta tilaelementeistä rakennettaessa tehdään ensin työmaalla perustukset valmiiksi. Samaan aikaan elementtejä kasataan tehtaalla ja kun elementit ja perustukset ovat valmiit, voidaan elementit kuljettaa työmaalle ja asentaa suoraan perustusten päälle. Tilaelementtejä suunniteltaessa on siis otettava huomioon myös elementin siirreltävyys. Elementit ovat usein hyvin kevyitä verrattuna teräsbetonirakenteisiin, joten paino ei useimmiten tule kuljetuksen tai nostojen kannalta rajoittavaksi tekijäksi. Siitä huolimatta elementissä on oltava noston kestävät kiinnikkeet. Kuljetusten ja tilaelementin yleisen käsiteltävyyden kannalta elementin tulisi olla luonnollisesti mahdollisimman pieni ja yksinkertaisen muotoinen, kun taas elementtirakentamisen tehokkuuden kannalta tulisi kuitenkin pyrkiä mahdollisimman isoihin elementteihin. Tavallisessa kerrostalorakentamisessa yksi tilaelementti on usein yksi huone tai pieni huoneisto. [12, 16, 17.]

#### 4.2 Tilaelementit ullakkorakentamisessa

Ullakkohuoneistoista halutaan usein mahdollisimman avaria, jolloin kantavien ja jäykistävien seinien sijoittelu voi olla haastavampaa kuin uudisrakennusta rakennettaessa. Mikäli tilaelementin jäykistävissä seinissä on suuria aukkoja, saattaa kuljetuksen aikainen lisääjäykistys tulla tarpeeseen. Lisäksi ullakkohuoneistot rakennetaan vanhan rakennuksen mittojen puitteissa, jolloin ulkoseinälinjoihin, porraskäytävän, hormien, kantavien väliseinien ja pilarien sijainteihin ei voi vaikuttaa. Tilaelementtien tyypilliset enimmäismitat puuinfon mukaan ovat 12,0 x 4,2 x 3,2 m, joka saattaa rajata tilaelementtien käytön mahdollisuuksia ullakkorakentamisessa. Esimerkiksi tämän opinnäytetyön liitteen 5 Sturenkadun mallikohteessa ullakon kokonaiskorkeus ylittää 3,2 metrin rajan jo noin 1,5 metrillä. Useimmissa kohteissa pituus 12,0 metriä riittää, jolloin myös leveyttä on helppo säädellä uusien kantavien välipohjan teräspalkkien jakovälin mukaan. Tilaelementtien toimittajilla voi olla omia enimmäismittoja esimerkiksi heidän tehtaan vaatimusten mukaan, mutta suunnittelijan tulisi aina huomioida myös esimerkiksi kuljetuskaluston ja asennuspaikan asettamat vaatimukset. Ahtaissa kaupunkiolosuhteissa esimerkiksi kadut voivat olla hyvin kapeita, jolloin suuren elementin kääntely voi olla mahdotonta. Lisäksi nosturia ei välttämättä saa ihan joka paikkaan, jolloin on myös otettava huomioon nosturin suurimmat nostoetäisyydet. Tilaelementtien ulkomittojen lisäksi tilaelementtijaossa voi tuottaa haasteita myös rakennuksen muoto ja kantavien sekä jäykistävien väliseinien puute. Usein ullakkoasunnoista halutaan mahdollisimman

avaria, jolloin väliseiniä tehdään mahdollisimman vähän ja huonekorkeuden tulisi olla mahdollisimman korkea. Kattorakenteet on kuitenkin tuettava johonkin, joten pilareiden ja kantavien väliseinien sijoittelu vaatii tiivistä yhteistyötä arkkitehdin kanssa. [16, 17.]

Kun tilaelementtejä käytetään ullakon lisärakentamisessa, ovat työvaiheet ennen elementtien asennusta hyvin erilaiset kuin uudiskohteen kohdalla. Työ on luonnollisesti aloitettava vanhojen purettavien rakenteiden purulla, sekä tarvittaessa säästettävien rakenteiden suojaamisella. Tämän jälkeen suoritetaan asennusalustan valmistelu, eli tarvittavat vanhojen kantavien rakenteiden vahvistamiset ja mahdollisten uusien rakenteiden, kuten teräspalkkien lisäämiset. Asennustyön nopeuttamiseksi teräspalkit voitaisiin myös mahdollisesti kiinnittää jo tehtaalla. Lisäksi tehdään muut sellaiset työt, jotka tulee tehdä ennen elementtien asentamista, kuten välipohjan eristeiden lisäämiset. Kun alusta on valmis tilaelementtien asennusta varten, tuodaan valmiit elementit työmaalle ja asennetaan paikoilleen. Tämän jälkeen elementit kiinnitetään uusiin kantaviin palkkeihin, saumat ja aukot lämpöeristetään ja tiivistetään sekä poistetaan kuljetuksen aikaiset tuet ja rakennetaan muut mahdolliset rakenteet, joita ei elementtitoimituksessa voitu tai kannattanut toteuttaa. Lisäksi työmaalle jää LVIS-asennusten liittäminen talon vanhoihin linjoihin. [16, 17.]

## 5 CLT-tilaelementit

### 5.1 CLT-levyjien rakenne

CLT-tilaelementit valmistetaan massiivipuisista CLT-levyistä, joita käytetään myös sellaisenaan rakentamisessa. Levyt koostuvat kuvan 3 tapaan ristikkäin liimatuista puulevykerroksista. Kerrokset voivat olla eri paksuisia ja niiden lukumäärä voi olla 3, 5, 7 tai 8 rakenteellisista vaatimuksista riippuen. Levyn ulkomitat ovat suuret, esimerkiksi Stora Enson tehtaalta saadaan 2,95 x 16 m kokoisia levyjä paksuuden ollessa korkeintaan 400 mm. Levyn suuren koon ansiosta rakentaminen on nopeaa ja levyjen välisiä pussuliitoksia tulee vähän. Stora Enson käyttämä levyjen nimeämiskäytäntö perustuu levyn kokonaispaksuuteen, pääasialliseen kantosuuntaan sekä lamellikerrosten määrään. Paksuus kerrotaan millimetreinä ja kantosuunta kirjaimella C tai L, joista C tarkoittaa lyhyemmässä suunnassa kantavaa ja L pituussuunnassa kantavaa levyä. Esimerkiksi CLT 120 L5 on 120 mm paksu viidestä lamellista koostuva levy, jonka pääkantosuunta on pituussuunnassa, eli yleensä päällimmäinen, keskimmäinen ja alin

lamelli ovat pituussuuntaisia ja kaksi muuta poikittaissuuntaisia. Stora Enson tuottamat levyt valmistetaan Itävallassa, mutta myös Suomessa on yksi CLT-levyjen valmistaja. CrossaLam Kuhmo Ltd aloitti toimintansa ristiin laminoitujen levyjen tuottajana kesällä 2014. [3, 12.]



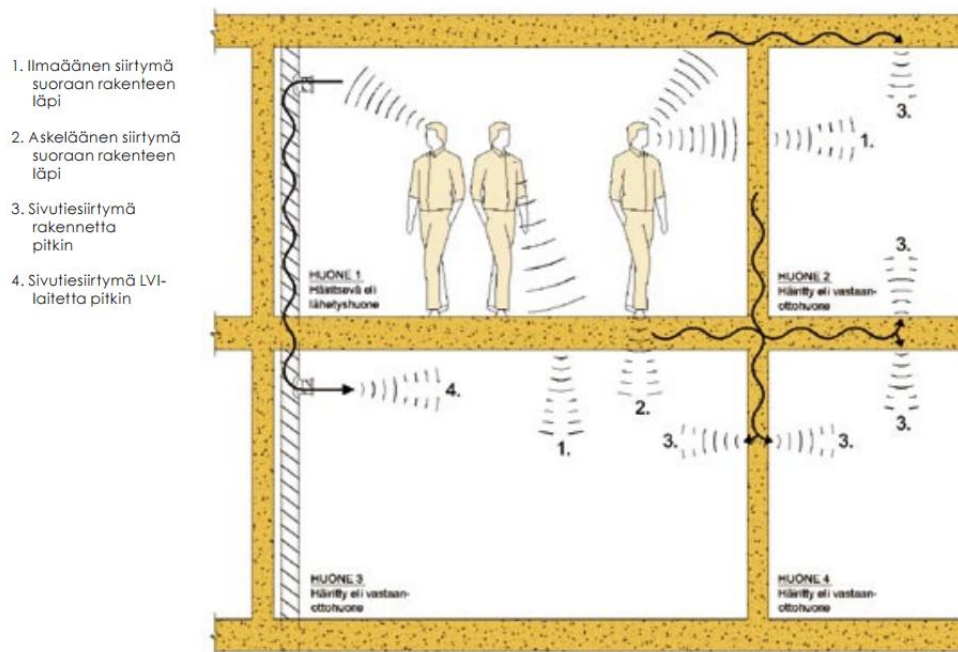
**Kuva 3. CLT-levyt koostuvat ristiin liimatuista puulevykerroksista. Kuvassa on esitettyä 3-kerroksinen levy. [4, s. 8.]**

CLT-levyt sopivat ominaisuuksiltaan rakentamiseen erittäin hyvin. Massiivipuista elementtiä voidaan työstää helposti ja hyvin tarkasti. Koska levyt koostuvat ristikkäin liimatuista kerroksista, jakautuvat kuormat kahteen suuntaan. Tämän ansiosta levy on lujempi ja jäykempi kuin tavallinen massiivipuu. Korkean lujuuden ansiosta voidaan käyttää myös esimerkiksi ohuempia välipohjarakenteita. CLT:n hyvän rakenteellisen jäykkyyden ansiosta rakennusten jäykistys saadaan tehtyä helposti. Tästä ominaisuudesta on hyötyä, kun levyistä rakennetaan tilaelementtejä. Tilaelementit vaativat jäykkyyttä ja lujuutta paljon jo pelkästään niiden siirtojen ja nostojen takia. Koska itse levyt ovat hyvin jäykkiä, tulee rakenteen mitoittavaksi tekijäksi helposti liitosten lujuus. Liitokset tehdään usein pitkillä ruuveilla CLT-levyn läpi toiseen levyyn ja liitoksen jäykistäväillä kulmateräksillä, jotka kiinnitetään levyihin ruuveilla. [3, 4, 11.]

## 5.2 Ääneneristävyys

Rakenteita mitoitettaessa huomioidaan kolme eri äänen kulkeutumismuotoa; ilmaääni, askelääni ja runkoääni. Ilmaääni on nimensä mukaisesti ilmassa kulkeva ääniaalto, joka aiheutuu esimerkiksi puheesta. Rakenteen ilmaääneneristävyttä kuvataan ilmaääneneristysluvulla  $R_w$  tai  $R_w'$ , joista ensimmäistä käytetään kun kyseessä on rakenteen laboratoriomittaus ja toista kun mittaus on tehty rakennuksessa. Askelääni taas syntyy nimensä mukaisesti kävelystä. Äskeläänen voimakkuuteen vaikuttaa lattian pin-

tamateriaalin kovuus. Esimerkiksi parketilla kävely tuottaa voimakkaamman äänen kuin muovimatolla kävely. Askelääneneristävyyttä kuvataan askeläänitasoluvuilla  $L_{n,w}$  ja  $L'_{n,w}$ , joista ensimmäistä käytetään kun kyseessä on rakenteen laboratoriomittaus ja toista kun mittaus on tehty rakennuksessa. Runkoäänellä tarkoitetaan ääntä, joka kulkeutuu rakenteessa mekaanisena värähtelynä aiheuttaen ilmaääntä. Tämän takia huoneistojen välillä rungossa tulisi olla jonkinlainen tärinäeristys, joka katkaisee ääniaallon kulkeutumisen. Tyypillisiä runkoääniä syntyy esimerkiksi pyykinpesukoneesta ja pianosta. Kuvassa 4 on havainnollistettu äänen etenemisreitit rakennuksessa. [28, 29.]



Kuva 4. Äänen etenemisreitit rakennuksessa. [29.]

Koska CLT-levyt valmistetaan massiivipuusta, ei niiden ääneneristävyyks massalain mukaan yllä sellaisenaan teräsbetonirakenteiden tasolle. Massalaki tarkoittaa sitä, että mitä tiheämpi materiaali on, sitä paremmin se eristää ääntä. Eli kun ääniaalto kohtaa rakenteen, syntyy rakenteessa värähtelyä. Mitä enemmän rakenne värähtelee, sitä enemmän se synnyttää ääntä rakenteen toiselle puolelle. Kevyt rakenne siis värähtelee samasta äänenpaineesta enemmän kuin raskas rakenne. Tavallisissa asuinhuoneissa rakenteen ilmaääneneristävyyttä voidaan arvioida "Ääneneristys puutalossa" -suunnitteluohjeen mukaan suuntaa-antavasti seuraavalla kaavalla:

$$R = 20 \log_{10}(m * f) - 49$$

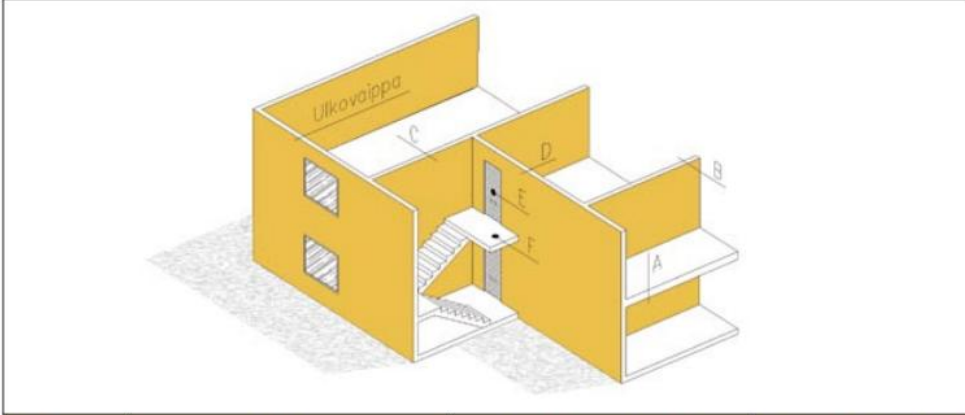
$R$  on rakenteen ilmaääneneristävyys [dB.]

$m$  on rakenteen massa [ $\text{kg/m}^2$ .]

$f$  on äänentaajuus [Hz.]

Äänentaajuuden arvona kaavassa voidaan käyttää 500 Hz, kun kyseessä on tavallinen asuinhuoneiden väliseinä. Rakenteen ilmaääneneristävyyteen vaikuttaa siis rakenteen massan lisäksi myös äänilähteen äänen taajuus. Rakenteiden ja tilojen välinen tarkka ilmaääneneristysluku määritetään vertailukäyrämenettelyllä koko taajuusalueen mittauksien perusteella. Vertailukäyrä on standardin ISO 717-1 mukainen käyrä, josta voidaan siis lukea ilmaääneneristysluku äänilähteen taajuuden perusteella, esimerkiksi tavallisissa huonetiloissa käytetään aiemmin mainittua 500 Hz:ä. [29.]

Vaatimusten ja toimitussopimuksen mukainen äänieristys on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa, kun suunnitellaan rakennetyyppejä. Ääneneristävyysvaatimukset on määritelty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1. Kyseiset vaatimukset on esitetty havainnollistaen myös kuvassa 5. Stora Ensolla on olemassa äänieristysratkaisuja heidän teknisen kansion (lähde 4) rakennusfysiikkaosiossa. Elementtien liitokset huoneistojen sisäisissä seinissä ja huoneistojen välisissä seinissä ovat erilaisia ääneneristävyyden takia. Yleensä huoneistojen sisällä lattia- ja kattolevy saa jatkua seinän ali tai yli huoneesta toiseen, mutta huoneistojen välisen seinän kohdalla ei. Tilaelementtirakentamisessa huoneistot yleensä ovatkin omia tilaelementtejään, joten tällöin kullakin tilaelementillä on omat lattia- ja seinälevyt. Huoneistojen väliseksi väliseinäksi riittää kun kahden tilaelementin CLT-seinälevyn väliin asennetaan mineraalivilla-levy. Tilaelementeistä ullakkohuoneistoja rakennettaessa tulisi myös selvittää ja estää äänien kulkeutuminen vanhoihin alla oleviin huoneistoihin. Ullakotiloja rakennettaessa asuinkäyttöön, joudutaan usein vanhan alalaattapalkiston yläpinnan lattiarakenteet purkamaan uusien kantavien rakenteiden tieltä. Tällöin ullakon ja ylimpien huoneistojen väliin jää ainoastaan noin 40–60 mm paksu betonilaatta, sekä tilaelementin lattiarakenteet. Nämä rakenteet riittävät usein ilmaääneneristämiseen, mutta askel- ja runkoäänien kulkeutuminen on edelleen mahdollista. Runkoäänien kulkeutumista ei tässä opinäytetyössä kuitenkaan tutkita työn laajuuden takia. Runkoäänien kulkeutumista vanhojen ja uusien rakenteiden välillä voidaan estää erilaisilla värinäeristeillä, jotka asennetaan esimerkiksi tilaelementtien ja niitä kannattelevien rakenteiden väliin. [4.]



Tunnus	Selite	Ilmaääneneristysluku	Askeläänitasoluku
A	Huoneistojen välinen välipohja	$R'_w \geq 55$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB
B	Huoneistojen välinen seinä	$R'_w \geq 55$ dB	-
C	Porrashuoneen ja huoneistojen välinen seinä yleensä	$R'_w \geq 55$ dB	-
D	Porrashuoneen ja huoneistojen välinen seinä, kun seinässä on ovi	$R'_w \geq 39$ dB	-
E	Huoneiston ovi <sup>1)</sup>	$R_w \geq 37$ dB	-
F	Uloskäytävästä huoneistoon	-	$L'_{n,w} \leq 63$ dB

<sup>1)</sup> Huoneiston ulko-ovena käytetään vähintään ääniluokan 30 dB ovea tai oviyhdistelmää. Tämä vaatimus saadaan täytettyä, kun käytetään huoneiston ulko-ovea tai oviyhdistelmää, jonka laboratoriossa mitattu ilmaääneneristysluku on  $\geq 37$  dB.

Kuva 5. Rakenteiden ääneneristävyyksivaatimukset asuinrakennuksessa. [29.]

### 5.3 Lämmöneristävyys ja kosteustekninen toiminta

Suomen rakentamismääräyskokoelman osien C3 ja D3 mukaisesti rakennuksen energiatehokkuus määritellään lämpöhäviön perusteella. Rakennettavan rakennuksen sallittu kokonaislämpöhäviö lasketaan osan C3 vaipan osien ja ikkunoiden U-arvojen mukaan. Todelliset vaipan osien U-arvot saavat olla heikompia kuin RakMk osassa C3 esitetyt arvot, mutta lämpöhäviön on pysyttävä niiden perusteella lasketun häviön rajoissa. Tämä on mahdollista siten, että osassa rakennusta on käytetty lämmönläpäisykertoimeltaan parempia rakenteita ja/tai lämpöenergiaa otetaan talteen ilmanvaihdon avulla. [26.]

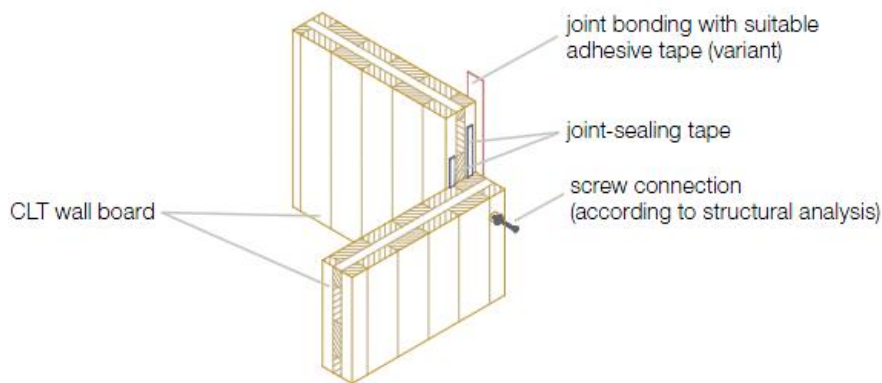
Puu eristää jo itse luonnostaan lämpöä paremmin kuin esimerkiksi betoni, joten siitä on helppo rakentaa tehokkaasti lämpöä eristäviä ulkoseiniä melko ohuin rakennekerroksin. Esimerkiksi, kun 100 mm paksun CLT-levyn ulkopintaan asennetaan 240 mm villaeriste (lämmönjohtavuus  $\lambda=0,04$  W/mK), saadaan rakenteen lämmönläpäisykertoimek-

si eli U-arvoksi  $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Parempia lämmöneristeitä (esimerkiksi Isover KL-33,  $\lambda=0,033 \text{ W}/\text{mK}$ ) tai paksumpia CLT-elementtejä käytettäessä päästään matalaenergiatason  $U=0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  alapuolelle. Laskelmissa käytetty CLT-levyn lämmönjohtavuuden  $\lambda$ -arvo on Stora Enson Itävallassa valmistettujen levyjen arvo. Lämmönjohtavuuden arvo tuotteelle on määritelty Ruotsin teknillisessä tutkimuslaitoksessa (SP Technical Research Institute of Sweden), jossa arvoksi saatiin  $\lambda=0,11 \text{ W}/\text{mK}$ . Suomessa valmistettavista CLT-elementeistä ei ole saatavilla vastaavia tietoja kuin Stora Enson Itävallassa valmistetuista elementeistä. [3, 4.]

CLT-elementeistä rakennettaessa on syytä kiinnittää huomiota myös sen kosteustekniseen toimintaan. Rakennusmateriaalina puuta on käytetty jo pitkään ja sen reagoiminen kosteuden ja lämpötilan vaihteluun tunnetaan hyvin. Koska CLT-levy on massiivipuuta, se on hieman huokoinen mutta kuitenkin hyvin tiivis. Vaipparakenteissa levyt toimivat rakenteen höyrinsulkuna, jolloin erillistä höyrinsulkumuovia ei tarvita. Ulkovaipassa olevat levyjen saumat tiivistetään aina saumaan asennettavilla tiivistysnauhoilla ja/tai tiivistysteipillä, kuten kuvissa 6 ja 7. Kun kaikki saumat on tiivistetty oikein, rakennuksen ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  on Stora Enson teknisen ohjeen mukaan mahdollista saavuttaa passiivirakentamisen vaatima arvo  $q_{50}=0,6 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ . Toteutunutta ilmatiiveyttä on mitattu ainakin Vantaalle rakennetussa Suomen ensimmäisessä rapatussa CLT-talossa VillaRa:ssa. Rovaniemen ammattikorkeakoululle tehdyssä opinnäytetyössä ”CLT-levyjen soveltaminen suomalaiseen pientalorakentamiseen” opinnäytetyön tekijä Jani Brännare haastatteli VillaRa:n rakennuttajaa. Haastattelussa selvisi, että rakennuksen energiatodistukseen mitattu ilmanvuotoluku on  $q_{50}=0,6 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ . [4.]

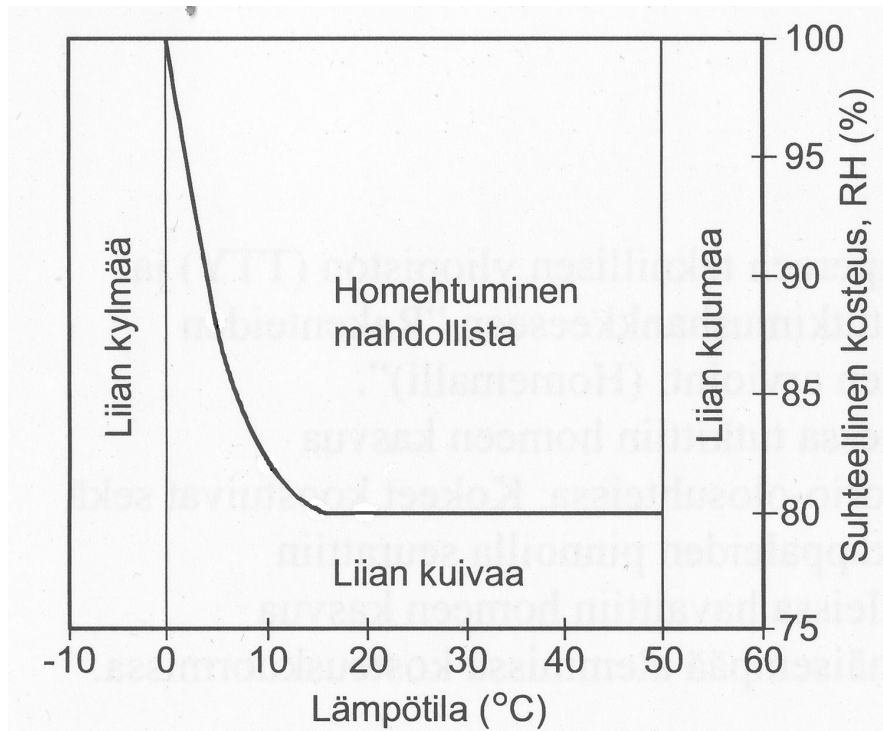


**Kuva 6. Tiivistyksessä käytettäviä materiaaleja. Oikeassa alakulmassa oleva tiivistysteippi asennetaan sauman päälle, kun muut nauhat asennetaan sauman väliin. Vaativissa saumoissa voidaan käyttää sekä tiivistisnauhaa, että -teippiä. Suomessa RunkoPES 2.0 detaljikirjastossa käytetään lähes poikkeuksetta EPDM-kumitiivistettä. [4.]**



**Kuva 7. Seinän nurkkaliitoksen tiivistys. Saumaan asennettavan tiivisteen lisäksi liitos teipataan toiselta puolelta. [4.]**

Hyvän tiiveyden lisäksi rakenne kuitenkin tarvitsee myös hyvän lämmöneristyksen, jotta kosteus ei pääse tiivistymään kahden tiiveydeltään toisistaan poikkeavan materiaalin rajapintaan. Ilma- ja kosteusvirran rakenteessa tulisi olla sisältä ulospäin. Ihanteellisessa vaipparakenteessa rakenne muuttuu huokoisemmaksi ulospäin mentäessä, jolloin virtauksilla on vähiten vastusta rakenteen ulkopinnassa. Erityisen tärkeää on siis valita tuulensuojalevyksi lämmöneristetty huokoisempi levy, jonka ulkopinta on tuulensuojapinnoitettu. Jotta kosteus pääsee rakenteesta ulos, on tuulensuojan ja sateelta suojaavan tiiviin ulkoverhouksen välissä oltava riittävä tuuletusrako. Vaipparakenteita suunniteltaessa on pyrittävä pitämään suhteellinen ilmankosteus rakenteen sisällä alle 80 %. Mikäli suhteellinen kosteus nousee tälle tasolle tai korkeammaksi ja lämpötila on yli 15 °C, on rakenteessa hyvät olosuhteet homeen kasvulle, kuten kuvan 8 kuvaaja osoittaa. Hometta pystyy kasvamaan kylmemmässäkin lämpötilassa aina 0 °C:n saakka, mutta tällöin suhteellisen kosteuden on oltava korkeampi. Kosteuden siirtymistä ja lämpötilan muutoksia voidaan laskea helposti esimerkiksi valmiilla tietokoneohjelmilla kuten WUFI:lla tai Excel-taulukkolaskentaohjelmaan perustuvilla laskentapohjilla, joita tässä opinnäytetyössä käytettiin. CLT-rakennetyyppien lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta lisää luvussa 6. [19, 23.]



Kuva 8. Homeen kasvuille sopivat olosuhteet. Hometta ei esiinny, kun lämpötila on alle 0 °C tai yli 50 °C, näiden välissä homehtuminen on mahdollista ilman suhteellisesta kosteudesta riippuen. [23.]

#### 5.4 Palonkesto ja palomääräykset

##### 5.4.1 CLT-levyn palonkesto

Massiivipuurakentamisesta puhuttaessa nousee yleensä esille rakennuksen paloturvallisuus. Massiivipuu kestää kuitenkin tulipalossa huomattavasti luultua paremmin. Palotilanteessa lämpötilan noustessa 100 °C:een puusta haihtuu sen sisältämä vesi, jota CLT-levyissä on noin 12 %. Tämän jälkeen puun lämmitessä lisää noin 250 – 300 °C:een se syttyy ja alkaa hiiltä noin 0,8 mm/min, liimapuulla vastaava arvo on 0,7 mm/min. Puun syttymisherkkyys lisääntyy tiheyden ja kosteuden vähetessä sekä puukappaleen paksuuden ohetessa. Pinnan hiiltyminen suojelee sisempiä kerroksia, jolloin hiiltymisnopeus hidastuu koko ajan palon edetessä. Stora Enson kotisivuilta löytyy myös raportteja, joissa itävaltalainen tutkimuslaitos Holzforschung Austria on testannut CLT-levyjen palonkestävyyttä eurokoodien mukaisesti. Raporteista käy ilmi, että paloluokan REI60 seinärakenteen voi saavuttaa jo pelkällä 100 mm paksulla CLT-levyllä. Ohuempia paksuuksia käytettäessä lisätään CLT-levyn pintaan kipsilevy tai palonsuojalevy. Paloluokkaan REI120 päästään myös melko yksinkertaisella rakenteella.

100 mm paksun levyn pintaan asennetaan 40 mm mineraalivillaa ja 12.5 mm paksu palonsuojalevy. Välipohjarakenteissa on mahdollista päästä REI60 paloluokkaan pelkästään 140 mm paksulla CLT-levyllä tai 100 mm CLT-levyllä, jonka pinta on suojattu palonsuojalevyllä. Myös paloluokka REI90 on saavutettavissa välipohjarakenteissa, kun käytetään paksumpia CLT-levyjä tai ne suojataan palonsuojalevyin. [4, 9.]

#### 5.4.2 Suojaverhoukset ja rakennustarvikkeiden luokat

Rakennusmateriaalit jaetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 eri luokkiin perustuen niiden osallistumisesta paloon, savuntuottoon ja palavien pisaroiden tuottamiseen. Luokan ensimmäinen kirjain A-F kuvaa tarvikkeen osallistumista paloon, viivan jälkeen tuleva osa s1, s2 tai s3 kuvaa savuntuottoa palossa ja viimeinen osa kuvaa palavan materiaalin tuottamia palavia pisaroita tai osia. Esimerkiksi luokka D-s2, d0 -merkintä tarkoittaa, että kyseessä on materiaali jonka osallistuminen paloon on hyväksyttävissä, savuntuotto on vähäistä ja palavia pisaroita tai osia ei esiinny. Taulukossa 1 on selitetty kaikkien eri merkintöjen selitteet. Luokissa A1 ja F ei käytetä lainkaan lisämääreitä, sillä ensin mainittu ei pala lainkaan ja toisen käyttäytymistä ei ole määritetty. [10.]

**Taulukko 1. Rakennustarvikkeiden luokat lisämääreineen lukuun ottamatta lattiapäällysteitä. [10.]**

Selite:	
A1	Tarvikkeet, jotka eivät osallistu lainkaan paloon.
A2	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu.
B	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu.
C	Tarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti.
D	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä.
E	Tarvikkeet, joiden käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä.
F	Tarvikkeet, joiden käyttäytymistä ei ole määritetty.
s1	Savuntuotto on erittäin vähäistä.
s2	Savuntuotto on vähäistä.
s3	Savuntuotto ei täytä s1 eikä s2 vaatimuksia.
d0	Palavia pisaroita tai osia ei esiinny.
d1	Palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti.
d2	Palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 eikä d1 vaatimuksia.

Lattianpäällysteiden luokat määritellään hieman eri merkinnöillä. Taulukon 2 mukaisesti ensimmäisen kirjaimen jälkeen merkitään alaindeksi FL, mutta itse selitteet ovat samo-

ja kuin muilla materiaaleilla. Savuntuottoluokkia latioilla on vain kaksi ja pisarointiluokista ei ole lainkaan. Esimerkiksi  $D_{FL-s1}$  kuvaa lattianpäällystettä, jonka osallistuminen paloon on hyväksyttävissä ja savuntuotto on rajoitettu. Lisäksi vielä putkimaiset lämmöneristeet jaetaan luokkiin  $A_{1L}$ ,  $A_{2L}$ ,  $B_L$ ,  $C_L$ ,  $D_L$ ,  $E_L$ ,  $F_L$  ja niiden savuntuottoa ja pisarointia samoilla lisämääreillä kuin taulukossa 1. [10.]

**Taulukko 2. Lattiapäällysteiden luokat [10.]**

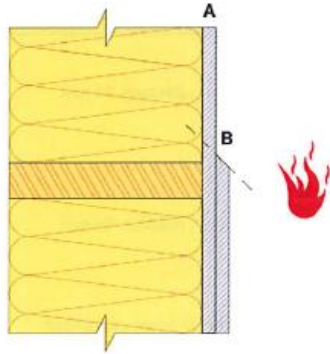
Selite:	
$A_{1FL}$	Tarvikkeet, jotka eivät osallistu lainkaan paloon.
$A_{2FL}$	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu.
$B_{FL}$	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu.
$C_{FL}$	Tarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti.
$D_{FL}$	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä.
$E_{FL}$	Tarvikkeet, joiden käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä.
$F_{FL}$	Tarvikkeet, joiden käyttäytymistä ei ole määritetty.
s1	Savuntuotto on erittäin vähäistä.
s2	Savuntuotto on vähäistä.

Rakennustarvikkeiden osallistumista paloon kuvaavien luokkien ja niiden lisämääreiden lisäksi rakentamismääräyskokoelman osassa E1 on määritelty neljä eri suojaverhoukluokkaa. Luokat ovat  $K_1 10$ ,  $K_2 10$ ,  $K_2 30$  ja  $K_2 60$ , joissa K-kirjaimen perässä oleva luku kuvaa aikaa minuutteina, kuinka kauan verhous suojaa sen takana olevaa rakennetta syttymiseltä, hiiltymiseltä tai muulta vaurioitumiselta. [10.]

#### 5.4.3 CLT-levyjen suojaverhoukset

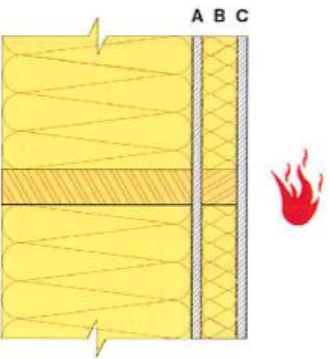
CLT-levyjen pinnan paloluokka seinissä kuuluu luokkaan D-s2, d0 ja latioissa luokkaan  $D_{fl-s1}$ . Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E1 sallii kyseisen luokan materiaalien käytön kantavissa rakenteissa, kun kyseessä on P2-luokan kohde, tai enintään 7 -kerroksinen P1-luokan asuinrakennuksen jälkeenpäin rakennettava lisäkerros. Molemmissa tapauksissa kantavat rakenteet tulee kuitenkin suojata suojaverhouksella. P2-luokassa 1 – 2 -kerroksisissa taloissa suojaverhoukseksi riittää  $K_2 10$  -luokan verhous, jos rakenne ei ole vähintään B-s1, d0 -tarvikkeista. 3 – 4 -kerroksisissa P2-luokan taloissa tarvitaan myös  $K_2 10$  -luokan suojaverhous, jos rakenne ei ole vähintään A2-s1, d0 -tarvikkeista. 5 – 8 -kerroksisissa P2-luokan taloissa ja aiemmin mainituissa enintään 7-kerroksisissa P1-luokan asuinrakennusten lisäkerroksissa vaaditaan  $K_2 30$  -luokan

suojaverhous, jos rakenne ei ole vähintään A2-s1, d0 -tarvikkeista. Edellä mainituissa rakennuksissa rakenne tulee suojata myös ulkopuolelta K<sub>2</sub>10, A2-s1, d0 -materiaalilla, jos julkisivu on tehty vähintään B-s2, d0 -tarvikkeista. K<sub>2</sub>30-luokan suojaverhous saadaan esimerkiksi kuvan 9 materiaaleilla.

	Suojausmenetelmä	Suojaverhousluokka	Tarvikkeen paloluokka
		<b>LEVYTYS KIPSILEVYLLÄ</b>	<b>K<sub>2</sub> 30</b>
	<b>Kerros A:</b> 1x kuitukipsilevy EN 15283, paksuus 18 mm <i>tai</i> <b>Kerros A:</b> 1x kuitukipsilevy EN 15283, paksuus 10 mm <b>Kerros B:</b> 1x kuitukipsilevy EN 15283, paksuus 10 mm <i>tai</i> <b>Kerros A:</b> 1x kipsikartonkilevy EN 520, paksuus 13 mm <b>Kerros B:</b> 1x palokipsikartonkilevy EN 520, paksuus 15 mm		
	<i>Levyjen suojaverhousajat vaihtelevat valmistajakohtaisesti.            Levyn suojaverhousaika tulee tarkastaa tuotesertifikaalista.</i>		

Kuva 9. Suojaverhousluokan K<sub>2</sub>30 tarvikkeita. [11.]

K<sub>2</sub>30-luokan suojaverhouksen voi kuitenkin korvata EI 30 -luokan osastoivalla rakenteella, jossa suojattavaa rakennetta vasten on K<sub>2</sub>10, A2-s1, d0 suojaverhous. EI 30 -luokan osastoiva rakenne saavutetaan esimerkiksi asentamalla suojattavaa rakennetta vasten kuvan 10 mukainen rakenne.

	Suojausmenetelmä	Osastoivuus	Rakennetta vasten
		<b>OSASTOIVA RAKENNE</b>	<b>EI 30</b>
	<b>Kerros A:</b> 1x kipsikartonkilevy EN 520, paksuus 13 mm <b>Kerros B:</b> koolaus 48x48 k600 ja mineraalivilla $\rho \geq 15 \text{ kg/m}^3$ , paksuus 48 mm <b>Kerros C:</b> 1x kipsikartonkilevy EN 520, paksuus 13 mm <i>tai</i> <b>Kerros A:</b> 1x kuitukipsilevy EN 15283, paksuus 10 mm <b>Kerros B:</b> koolaus 48x48 k600 ja mineraalivilla $\rho \geq 15 \text{ kg/m}^3$ , paksuus 48 mm <b>Kerros C:</b> 1x kuitukipsilevy EN 15283, paksuus 10 mm		
	<i>Mineraalivilla tulee tarvittaessa kiinnittää rakenteeseen, jotta se pysyy paikoillaan pintalevyn putoamisen jälkeen.</i>		

Kuva 10. EI 30 -luokan osastoiva suojaverhous. [11.]

Puurakenteinen ulkoseinä täytyy suojata palolta myös ulkopuolelta. Kosteusteknisesti tämä toteutetaan turvallisimmin, kun eristeenä käytetään palamatonta A2-s1, d0 -luokan tiheää lämmöneristettä, kuten kivivillaa. Jos eristekerros on materiaalia, joka ei

sellaisenaan suojaa rakennetta palolta, täytyy sen ulkopintaan asentaa tiiviimpi suoja-verhous kuten tuulensuojakipsilevy. Tuulensuojakipsilevy ei kuitenkaan ole korkean tiheydensä takia kosteusteknisesti hyvä ratkaisu, koska se häiritsee kosteusvirtaa rakennuksen sisältä ulos. Ulkopuoliseen suojaverhoukseen vaikuttaa ulkoverhousmateriaali. Jos ulkoverhous tehdään luokan D-s2, d2 materiaalista, eli esimerkiksi puisista ulkoverhouspaneeleista, tulee suojaverhousluokan olla vähintään  $K_210$  tai EI 15. Tähän riittää tuulensuojapinnoitettu A2-s1, d0 -luokan jäykkä kivivillaeriste, mutta tuuletusrakoon on asennettava lisäksi palokatkoprofiili yhtä kerrosta kohden. Mikäli julkisivu on tehty B-s2, d2 -luokan tarvikkeista, kuten tiili ja rappauslevyt, riittää palosuojaukseksi A2-s1, d0 -luokan jäykkä kivivilla. Rakenteiden ja putkien väliset tiivistykset on esitetty luvussa 7.2. [10, 11, 21, 22.]

#### 5.4.4 Automaattinen alkusammutus

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 mukaan vähintään P2 -luokkaan kuuluvat 3 – 8 -kerroksiset rakennukset tulee varustaa automaattisella sammutuskalustolla, eli sprinklerilaitteistolla. Määräys ei kuitenkaan koske 3 – 4 -kerroksisia P2-luokan asuinrakennuksia, joissa kaikki kerrokset kuuluvat samaan asuinhuoneistoon ja rakennuksen korkeus on enintään 14 metriä. Helsingin rakennusvalvontaviraston asettamissa ullakkorakentamisen ehdoissa ei ole mainintaa sprinklerilaitteistosta, mutta porrashuoneet on varustettava savunpoistoluukuilla tai -ikkunoilla mikäli niitä ei ennestään ole. Luvussa 3 kuitenkin todetaan, että paloturvallisuuden osalta ullakkorakentamisessa noudatetaan uudisrakentamisen määräyksiä. Tällöin ullakkohuoneistoihin tulisi asentaa sprinklerilaitteisto. Helsingin rakennusvalvontaviraston edustajan lausunnon mukaan jälkeinpäin rakennettavalle ullakkohuoneistolle ei edellytetä sprinklerilaitteistoa, mikäli rakennuksessa sitä ei ennestään jo ole. Tällöin kuitenkin edellytetään, että rakentamismääräyskokoelman osan E1 määräyskohdan 6.2.3 ehdot täyttyvät. Eli kantavat rakenteet saavat olla puuta, mutta niiden palonkestoaajan tulee olla vähintään R60 ja suojaverhousvaatimus on tällöin  $K_230$ . Lisäksi lämmöneristeiden tulee pääosin olla palamattomia. [10.]

## 6 Rakennetyyppien tutkiminen

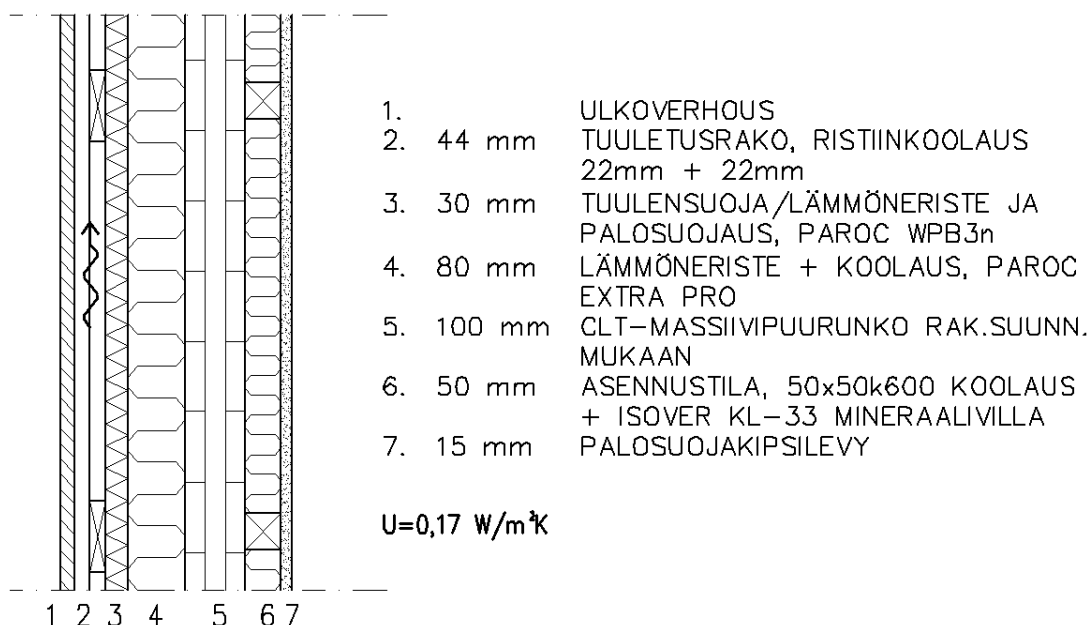
### 6.1 Tutkimusmenetelmä ja tutkittavat rakennetyypit

Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena oli tuottaa yritykselle CLT-rakennetyyppimalleja. Tässä luvussa tutkitaan kyseisten yläpohja- ja ulkoseinärakenteiden kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa. CLT-runkoisia ulkoseinä- ja yläpohjarakenteita tutkittiin Excel-ohjelmalla tehdyllä laskentapohjalla, joka laskee rakenteen lämpö- ja kosteusjakauman. Saadut tulokset tarkistettiin WUFI laskentaohjelmalla, johon on ladattu Stora Enson CLT lisäosa. Excel-laskentapohjaan ei ole tallennettu rakennusmateriaalien ominaisuuksia. Laskelmissa tarvitaan lähtötiedoiksi kaikkien rakennekerrosten lämmönjohtavuudet ja kosteudenläpäisyvastukset. Tavallisille rakennusmateriaaleille, kuten mineraalivillalle ja kipsilevylle käytettiin liitteen 3 sivujen 2 - 5 mukaisia valmiiksi taulukoituja arvoja ja kivivillalle Paroc:n ilmoittamia tuotekohtaisia arvoja. CLT-levyn kosteudenläpäisyvastuksena ei voi kuitenkaan käyttää tavallisen puun taulukoitua arvoa, sillä lamellien väliset liimaukset vaikuttavat hieman sen arvoon. Puufon CLT-materiaalisivulla kerrottiin kuitenkin standardin EN 12524 mukainen vesihöyrynvastuskerroin, jota merkitään pienellä kreikkalaisella  $\mu$ -kirjaimella. Vesihöyrynvastuskertoimen avulla määritettiin materiaalin kosteudenläpäisyvastus  $Z_p$  liitteen 4 mukaisesti. Rakenteiden lämpö- ja kosteusjakamalaskelmat on esitetty liitteessä 2.

### 6.2 Ulkoseinät

Ulkoseinärakenteena tutkittiin rakennetta, jossa kantavan CLT-rungon sisäpuolella on ohut kerros mineraalivillaa sekä kipsilevy ja ulkopuolella paksumpi kerros kivivillaa sekä tuulensuojalevy ja pintarakenteet. Vaipparakenteen toiminnan kannalta on tärkeää, että kosteutta ei pääse tiivistymään rakenteen sisälle. Yleensä kosteus voi päästä tiivistymään kahden tiheyksiltään erilaisen materiaalin rajapintaan, eli tässä se voi olla mahdollista CLT-levyn ja lämmöneristeen sekä lämmöneristeen ja tuulensuojan rajapinnoissa. Kun lämmöneristeiden suhde CLT-levyn sisä- ja ulkopuolien välillä on sopiva ja kosteusvirta rakenteen läpi on sisältä ulospäin, ei tiivistymistä pääse tapahtumaan. CLT-levyn sisäpintaan voidaan asentaa noin 50 mm mineraalivillaa, jolloin sisäpuolelle saadaan esimerkiksi sähköasennuksille tilaa ja samalla saadaan palomääräysten vaatima sisäpinnan paloluokitus rakenteelle, kun villan pintaan asennetaan palosuojalevy. Sisäpuolista eristepaksuutta ei voi tästä juuri kuitenkaan nostaa, sillä

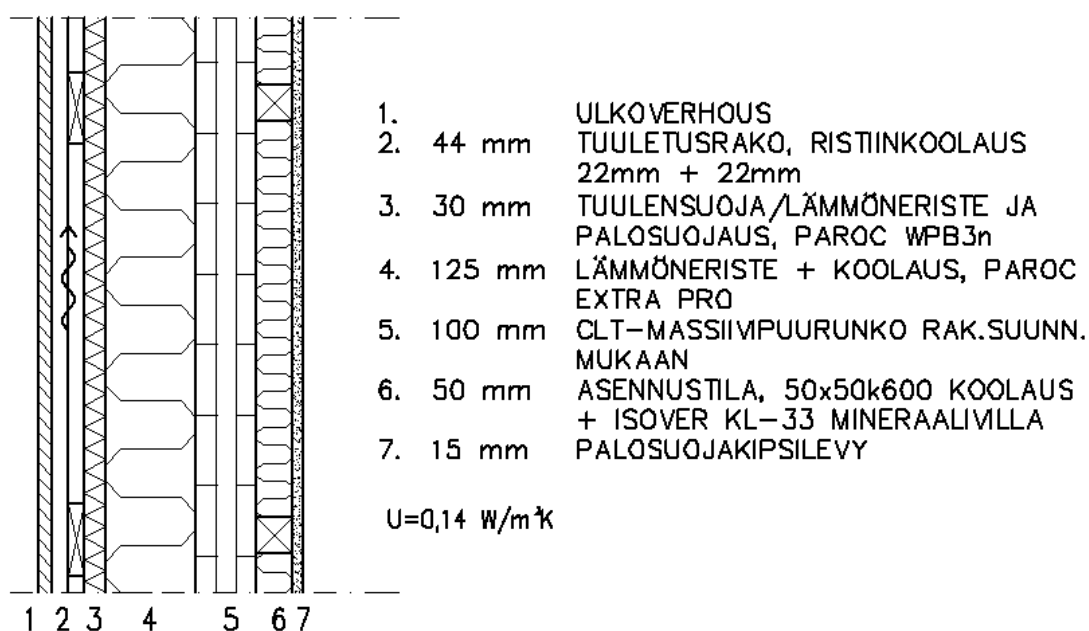
muutoin myös ulkopuolisen eristekerroksen tulisi olla tarpeettoman paksu. Tällöin vaarana on, että CLT-levyn ja sisäpuolisen eristeen välissä kosteus nousee yli RH 80 %, jolloin homeen kasvu on mahdollista. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C3 esittämä lämmönjohtavuuden vertailuarvo ulkoseinissä on  $U=0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , joka saavutetaan esimerkiksi kuvan 11 mukaisella rakenteella.



**Kuva 11. Ulkoseinärakenne, jonka eristekerros on riittämätön, kun lämpötila laskee alle  $-17 \text{ }^\circ\text{C}$ :een.**

Kuvan 11 rakenne toimii kesällä normaalisti, mutta talvella kun sisäilman suhteellinen kosteus laskee noin RH 40 %:iin ja ulkona lämpötila laskee alle  $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ :een, nousee suhteellinen kosteus sisemmässä mineraalivillakerroksessa RH 80 %:iin. Etelä-Suomessa keskilämpötila vuosina 1961 – 1990 kylmimpinä kuukausina, eli tammikuussa ja helmikuussa on kuitenkin vain noin  $-7 \text{ }^\circ\text{C}$  liitteen 3 taulukon mukaan, mutta todellisuudessa joinakin talvina lämpötila voi laskea alle  $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ :een useaksi päiväksi. Lisäksi laskentamalli laskee vain ehjän ja yhtenäisen eristepinnan mukaan, jolloin esimerkiksi se ei huomioi kylmäsiltoja lainkaan. Tämän takia eristekerroksia ei tulisi mitoittaa sen mukaan, mikä olisi täsmälleen tarvittu eristepaksuus. Liitteen 2 sivulla 1 on esitetty kuvan 11 rakenteen lämpötila- ja kosteusjakauman laskentataulukko ja lämpötilan sekä vesihöyryn paineen kuvaaja. Kuvaajasta nähdään, että vaikka suhteellinen kosteus nousee homeen kasvun kannalta sisäpuolisessa eristeessä vaaralliselle tasolle, ei kosteutta kuitenkaan tiivisty rakenteessa missään kohtaa. Mikäli vesihöyryn paineen ja kriittisen paineen käyrät risteäisivät, tiivistyisi kosteus sitä kohtaa lähimmälle pinnalle. Hetkellinen suhteellisen kosteuden nousu ei ole vielä kovin vaarallista, mutta pidem-

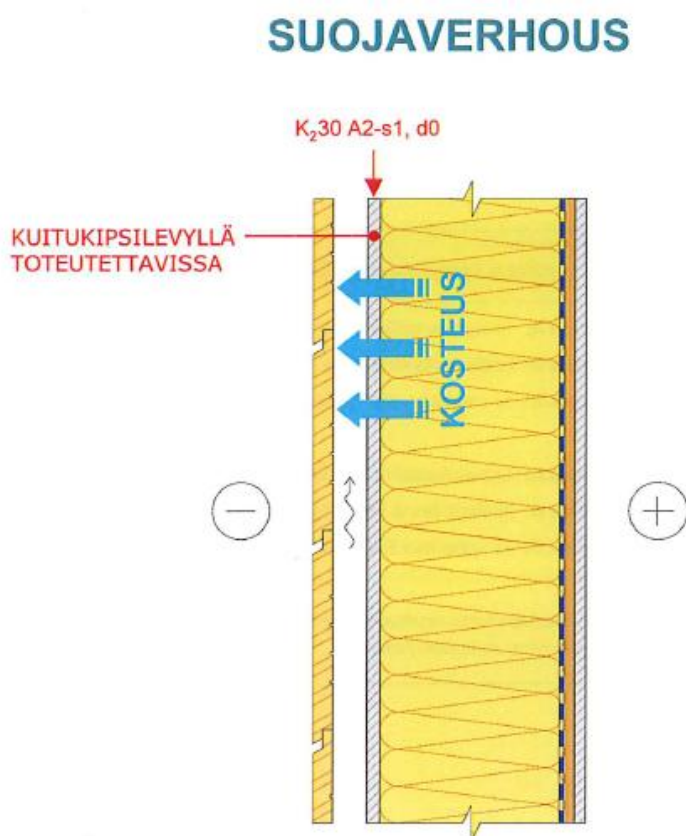
mällä aikavälillä homeen kasvu on mahdollista. Rakenne toimisi kosteusteknisesti paremmin, jos sisäpuolen lämmöneristys siirrettäisiin CLT-levyn ulkopuolelle. Tällöin kuitenkin menetetään sisäpuolen asennustila. Myös kosteusteknisesti turvallinen rakenne saadaan asennustila säilyttäen, kun ulomman eristekerroksen paksuus (Paroc eXtra pro) nostetaan vähintään 125 mm:iin kuten kuvan 12 rakennetyypissä. Tällöin ulkoseinärakenne saavuttaa U-arvon  $U=0.14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , joka riittäisi jo passiivitalon ulkoseinärakenteen lämmönläpäisyarvoksi. Tämä rakenne on toimiva vielä, kun lämpötila laskee noin  $-27 \text{ }^\circ\text{C}$ :een, joten se on ainakin Etelä-Suomessa täysin riittävä. Liitteen 2 sivuilla 3 ja 4 on esitetty toimivasta rakenteesta vastaavat laskelmat ja kuvaja kuin kuvan 11 rakennetyypistä. Laskentataulukosta nähdään, että suhteellinen kosteus rakenteen sisällä pysyy alle RH 80 % joka rakennekerroksessa ja kuvaajassa vesihöyryn paineen ja kriittisen paineen käyrät eivät risteä, joten kosteutta ei pääse tiivistymään rakenteen sisälle. Rakenne on siis kosteusteknisesti toimiva.



**Kuva 12. Toimiva ulkoseinärakenne.**

Ulkoseinärakenteen toimivuuden kannalta on myös tärkeää, että tuulensuojalevyn ja ulkoverhouksen välissä on riittävä tuuletusväli. RunkoPES 2.0 osan 11 CLT- ulkoseinärakenteissa pidetään sopivana tuuletusrakona 35 mm, kun ulkopintaan asennetaan rapattu ulkoverhouslevy. Mikäli ulkoverhous on tiiltä, tulisi ilmaraon olla 50 mm ja puuverhousta käytettäessä 42 mm.

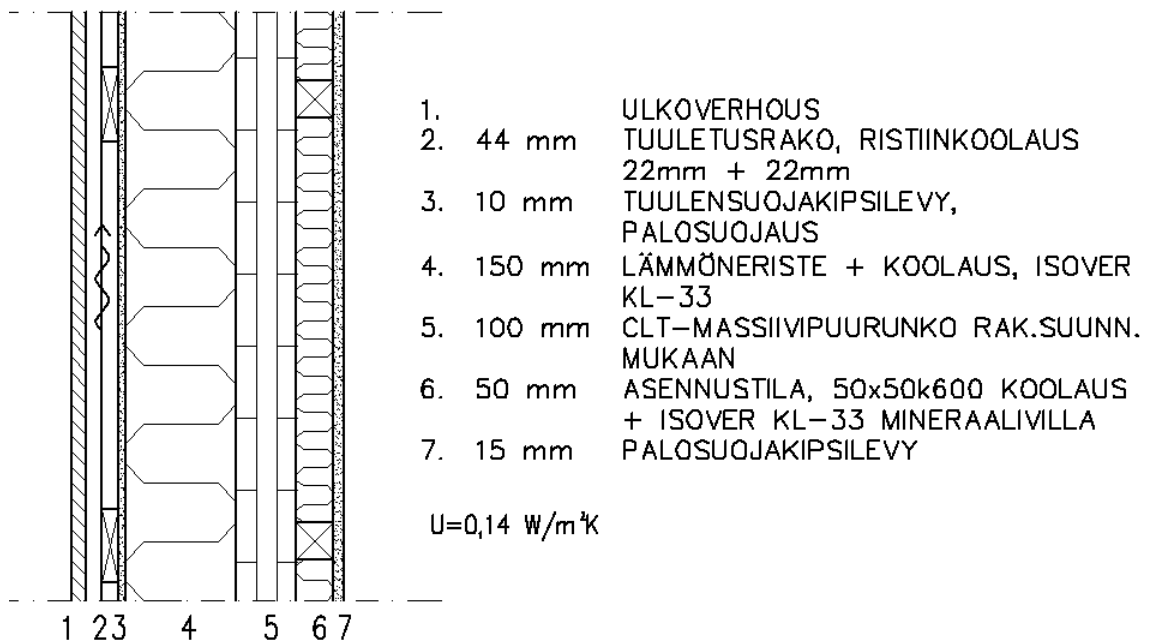
Ulkoseinien sisä- ja ulkopinta tulee suojata paloluokkien P1 ja P2 asuinrakennuksissa luvussa 5.4.3 esitetyillä suojaverhousmateriaaleilla. Yleisimmin Suomessa käytetään sisäpuolella verhouslevynä kuitenkin RunkoPES 2.0 mukaan 15 mm paksua A2-s1, d0 -luokan palokipsilevyä tai vastaavan luokan omaavaa kuitukipsilevyä 2x10 mm. Mikäli myös ulkopuolella käytetään tuulensuojana ja palosuojana kipsilevyä tai muuta vastaavaa eristekerrosta tiiviimpää materiaalia, tulee rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta olla varma. Puuinfon puurakenteiden suunnittelijoiden TuplaA-täydennyskoulutusaineiston moduulissa 2 ”Palomitoitus EN 1995-1-2 mukaan” Tero Lahtela esittää tavallisen puurankaseinän ulkopuoliseksi suojaverhoukseksi kuitukipsilevyä kuvan 13 tapaan. Kuvassa esitetään, että kosteusvirta läpäisee levyn ja rakenne pääsee tuuletumaan tuuletusrakoon.



**Kuva 13. Kuitukipsilevy toimii puurankarakenteisessa ulkoseinässä suojaverhouksena, joka ei kuitenkaan estä kosteusvirtaa siirtymästä tuuletusrakoon. [11.]**

Mikäli kuvan 13 kaltaista kuitukipsilevyverhousta käytettäisiin CLT-rakenteisen ulkoseinän suojaverhouksessa, rakenne voisi olla tällöin esimerkiksi kuvan 14 tapainen. Liitteen 2 sivulla 5 on laskelma rakenteen lämpö- ja kosteusjakaumasta, jossa on käytetty kuitukipsilevyille Fermacell kuitukipsilevyn arvoja. Fermacell ilmoittaa lämmönjohtavu-

deksi  $\lambda = 0,316$  (W/m\*K) ja vesihöyrynläpäisevyydelle arvon  $Z_p = 0,8$  (GPa\*s\*m<sup>2</sup>/kg), kun levyn paksuus on 12,5 mm. Kosteusjakauma näyttää, että ulkopuolisessa eristekerroksessa suhteellinen kosteus nousee reilusti yli RH 80 % jo -7 °C:ssa, joka on tammi- ja helmikuun keskilämpötila liitteen 3 mukaan. Lisäksi lämmöneristeen ja tuulensuojalevyn väliselle pinnalle tiivistyy kosteutta, kun lämpötila laskee alle -13 °C:een. Rakenne ei siis ole kosteusteknisesti yhtä toimiva kuin kokonaan kivillä eristetty ulkoseinärakenne, vaikka U-arvo on molemmissa sama. Tästä voidaan siten todeta, että kuitukipsilevyä ei suositella käytettäväksi tuulensuojana ja palosuojaverhouksena CLT-rungon kanssa. [11.]

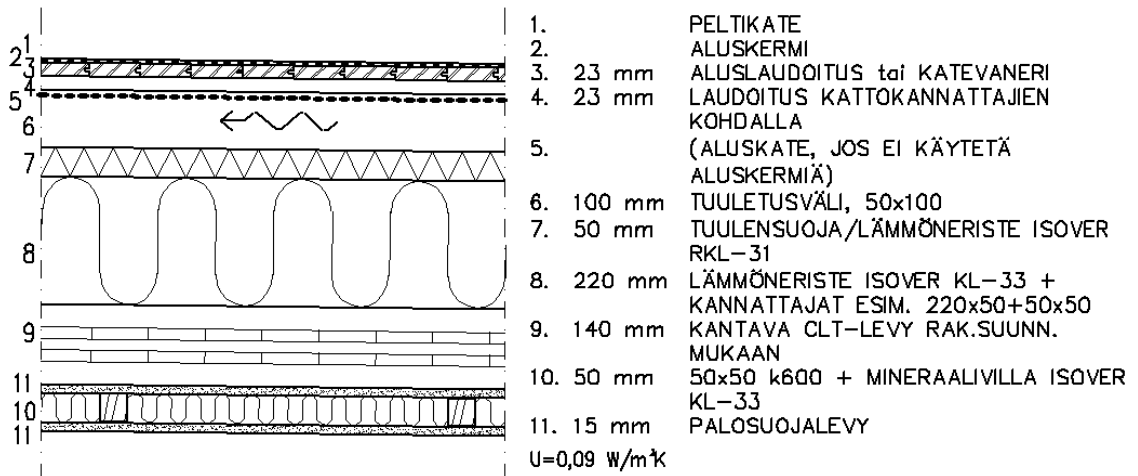


Kuva 14. Ulkoseinärakenne, palosuojaus toteutettu tuulensuojakipsilevyllä

### 6.3 Yläpohja

Yläpohjarakenteissa lämmöneristeenä tulee käyttää vähintään A2-s1, d0 -luokan materiaalia, eli myös monet mineraalivillat käyvät. Yläpohjarakenne koostuu kuvan 15 tapaan kantavan CLT-levyn päälle asennetuista lämmöneristekerroksista ja tuulensuojasta, tuuletusvälistä sekä vedeneristyskerroksesta. Sisäpuolella CLT-levyn pinta on suojattava sopivalla suojaverhouksella. Sisäpintaan asennetaan esimerkiksi 15 mm palokipsilevy, 50 mm puurangat ja mineraalivilla ja uloimpana vielä toinen 15 mm palokipsilevy. Yläpohjarakenteen U-arvon referenssiarvo Suomen rakentamismääräyskoelman osan C3 mukaan  $U=0,09$  W/(m<sup>2</sup>K), joka saavutetaan edellä mainitulla raken-

teella, kun lämmöneristeenä on mineraalivillaa 220 mm (Isover KL-33) ja tuulensuojapinnoitettua mineraalivillaa 50 mm (Isover RKL-31). Yläpohjarakenteen lämpö- ja kosteusjakauman laskentataulukko liitteen 2 sivulla 6 osoittaa, että suhteellinen kosteus rakenteessa pysyy alle RH 80 % joka kohdassa ja saman liitteen sivun 7 kuvaaja näyttää, että vesihöyryn paineen ja kriittisen paineen kuvaajat eivät leikkaa, eli kosteutta ei pääse tiivistymään rakenteessa.



**Kuva 15. Yläpohjarakenne.**

Tärkeänä osana myös yläpohjan kosteusteknistä toimivuutta on sen tuulettavuus. Koska ullakon kattokorkoa ei useimmiten saa juurikaan nostaa, yläpohjan rakennepaksuus ullakkorakentamisessa pyritään tekemään usein mahdollisimman ohueksi, jotta huonekorkeus pysyisi riittävänä. Tällöin on huolehdittava, että tuuletusväli tuulensuojan ja vesikatteen välillä on riittävä ja että se varmasti toimii suunnitellusti. Tällöin on tuuletusrakojen oltava myös räystäillä riittävän suuret ja ilman on päästävä poistumaan rakenteesta katon harjalla. Taulukossa 3 on esitetty hyvin tuulettuvan katon tuuletuksen ohjeellinen mitoitus. Kattoliiton Toimivat katot 2013 -julkaisun mukaan tuuletusväli voi olla pienempi kuin taulukon arvo pienillä katoilla tai katon osilla, mikäli poisto- ja korvausilma-aukkojen korkeusero on vähintään 500 mm ja ilman virtausmatka tuuletusvälissä on alle 3 m. Tällöin katoilla, joiden kaltevuus on 1:20 tai jyrkempi, tulee tuuletusvälin olla vähintään 50 mm. Loivemmillä katoilla kuin 1:20 tuuletusvälin tulee olla vähintään 100 mm.

Taulukko 3. Hyvin tuulettuvan katon tuuletuksen ohjeellinen mitoitus. [14.]

Kattokaltevuus	min. tuuletusväli	ilmanottoaukot promillea/katto-m <sup>2</sup>	poistoaukot promillea/katto-m <sup>2</sup>
1:40 tai loivempi	300 mm	2,5	2,5
1:40 - 1:10	200 mm	2,5	2,5
1:10 tai jyrkempi	100 mm	2,0	2,0

Pääosin lämmöneristeinä ullakolla tulisi käyttää palamatonta mineraali- tai kivivillaa. Helsingin rakennusvalvontaviraston laatimassa ullakkorakentamisen rakennustapaohjeessa sallitaan myös polyuretaanieristeiden käyttö, mutta vain paikallisesti muun muassa kattoikkunoiden osalla. Tällöinkin eristeet tulee koteloida paloturvalliseksi. [6, 14.]

## 7 Detaljit ja suunnitteluohje

### 7.1 Yleistä

Yritykselle opinnäytetyön tuloksena tuotetut mallidetaljit sisältävät tavanomaisiin ratkaisuihin soveltuvia CLT-rakenteiden liitosdetaljeja. Suunnitteluohjeessa on esitetty CLT-rakenteiden alustavaan suunnitteluun soveltuvia taulukoita ja muuta tietoa esimerkiksi lattian kantavien levyjen maksimijänneväleistä eri paksuisilla levyillä, kun lattiaan vaikuttaa tavallinen asuintilojen hyötykuorma. Lisäksi suunnitteluohje sisältää CLT-rakenteiden mitoituksessa käytettäviä kaavoja ja kertoimia, sekä uusien kantavien teräspalkkien alustavaa suunnittelua helpottavat teräspalkkien mitoituskäyrästä ja mitoitusaulukko. Käyrien ja taulukoiden avulla voidaan tehdä nopeasti karkea arvio tarvittavien teräspalkkien jakoväleistä ja profiilien kooista hankesuunnittelua varten.

### 7.2 Palokatkot

Palo-osastojen välisiin seiniin pyritään tekemään aina mahdollisimman vähän läpivientejä palon leviämisen estämiseksi. Osastoivien seinien läpivientejä ei voi kuitenkaan kokonaan poistaa, joten niiden toiminta palotilanteessa on varmistettava palokatkein. Palokatkojen avulla läpiviennin tulisi kestää palossa yhtä kauan kuin itse seinänkin. Palokatko yhdistys suosittelee vain ETA hyväksytyjen CE-merkittyjen palokatko tuotteiden käyttöä. Massiivipuorakenteet ovat kuitenkin vielä Suomen markkinoilla niin tuore keksintö, että hyväksytyjä palokatko tuotteita ei vielä ole. Palokatkoihin erikoistunut

suomalainen yritys Sewatek Oy myy kuitenkin CLT-elementtien läpivienteihin tarkoitettuja läpivientikappaleita. Yritys kertoo kotisivuillaan teettäneensä tuotteella polttokokeita, joiden perusteella läpiviennit kestävät yhtä pitkään kuin testatut puurakenteetkin. Tuotteella ei vielä vuonna 2014 ollut ETA-hyväksyntää, mutta yrityksen sivuilla kerrotaan läpivientien tulevan heidän seuraavaan ETA-asiakirjan laajennukseensa, jolloin tuotteelle saadaan myös CE-merkintä. Liitteessä 10 on esitetty läpivientikappaleen leikkauspiirustukset. Läpivientikappale koostuu metalliputkesta, jonka päissä on metalliset laipat. Laipat kiinnitetään CLT-levyyn ruuvaamalla. Läpivientikappaleita on kolme eri kokoa; R42, R62 ja R92, jotka on esitetty kuvassa 16. Luku kirjaimen R perässä tarkoittaa porattavan reiän halkaisijaa. Läpivientikappaleen putken ulkohalkaisija on 0,5 mm porattavaa reikää pienempi. Metalliputken ja poratun reiän väli tiivistetään akryylimassalla, kuten myös läpiviennin ja virtausputken väli reiän ulkoreunoilla. Sisemmällä läpivientiputken sisällä on solukumieriste, jonka avulla läpiviennistä saadaan kaasutiivis. Lisäksi putken sisälle asennetaan niin sanottu aktiivinen komponentti, eli palotilanteessa paisuva palokatkonauha. Nauhan paksuus on 2,5 mm ja sitä kierretään R42 läpiviennissä kaksi kierrosta, R62 läpiviennissä kolme kierrosta ja R92 läpiviennissä neljä kierrosta. [13, 15.]



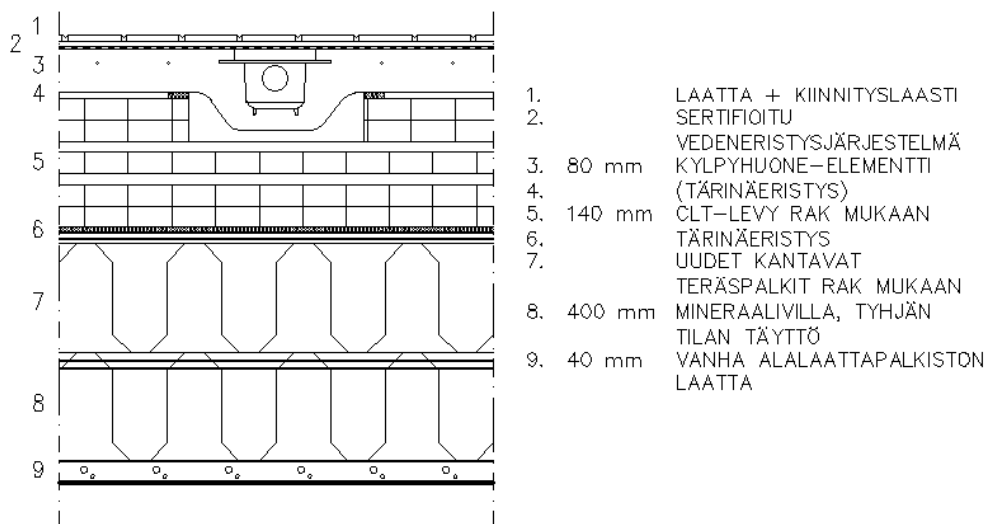
**Kuva 16. Sewatek massiivipuorakenteen läpivientikappaleista näkyy ulospäin vain ohut metallirengas, joka peittyy helposti suojaverhusten sisään. Kuvassa esitetty koot R42, R62 ja R92. [15.]**

Maaliskuussa 2015 Würth oy:n edustaja esitteli heidän markkinoilla olevia palokatko tuotteitaan Optiplan oy:n suunnittelijoille. Tilaisuudessa kysyttiin, onko Würthillä ETA -

hyväksytyä ratkaisua CLT-rakenteiden läpivienteihin. Würthin edustaja kertoi heidän tekevän yhteistyötä Sewatek Oy:n kanssa ja että heiltä on tulossa markkinoille läpivientiholkki CLT-rakenteille keväällä 2015 tai viimeistään syksyllä 2015.

### 7.3 Välipohja

Tilaelementtien CLT-lattialevyjen tehtävänä on toimia lattian kantavana rakenteena sekä eristää ääniä kulkeutumasta ullakkohuoneiston ja sen alapuolisen kerroksen välillä. Tilaelementin lattia tukeutuu uusiin teräspalkkeihin, jotka taas tukeutuvat rakennuksen vanhoihin kantaviin pystyrakenteisiin. Lattiarakenteen CLT-levyn paksuus riippuu levyn jännevälistä, eli uusien teräspalkkien jakovälisestä sekä levyn päälle tulevasta kuormasta. Esimerkiksi 5 metrin jännevälille normaalilla asuinrakennuksen hyötykuormalla  $2,0 \text{ kN/m}^2$  ja  $1,25 \text{ kN/m}^2$  pysyvillä kuormilla riittää 140 mm paksu CLT-levy Stora Enson laskentaohjelmalla laskettuna. Luvussa 7.7.2 on esitetty CLT-lattialevyjen mitoittamisen perusteita. Kantavan lattialevyn päälle asennetaan askelääneneristevillaa noin 30 mm, pintavalu 40 mm ja lattiapinnoite. Pintavalu toimii ääneneristävyyden lisäksi rakenteen palosuojauksena. CLT-levyn alle jäävä tila täytetään esimerkiksi mineraalivillalla alalataan yläpinnasta CLT-levyn alapintaan saakka. Lisäksi CLT-lattialevyn ja teräspalkin väliin on suositeltavaa asentaa runkoääniä eristävä tärinäeristin. CLT-elementeistä rakennetuissa kerrostaloissa kylpyhuoneessa on usein kylpyhuonelaatta-elementti, kuten kuvassa 17 on esitetty. Tällöin CLT-levyn pintaan saatetaan joutua tekemään urat viemärivetojen kohdilla. Teräsbetonisen kylpyhuonelaatan ja CLT-levyn väliin tulisi asentaa tärinäeristysmatto, jotta askel- ja runkoäänät eivät kulkeutuisi alapuolisiin ja viereisiin tiloihin. Varsinkin pyykinpesukoneen aiheuttama värähtely kulkeutuu hyvin herkästi rakenteita pitkin. Jotta kylpyhuoneen oviaukolle ei tulisi korkeaa kynnystä, suositellaan kylpyhuoneen lattian kantava CLT-levy tehtäväksi pienellä jännevälillä, jolloin myös sen paksuus voi olla pienempi kuin muualla rakennuksessa.

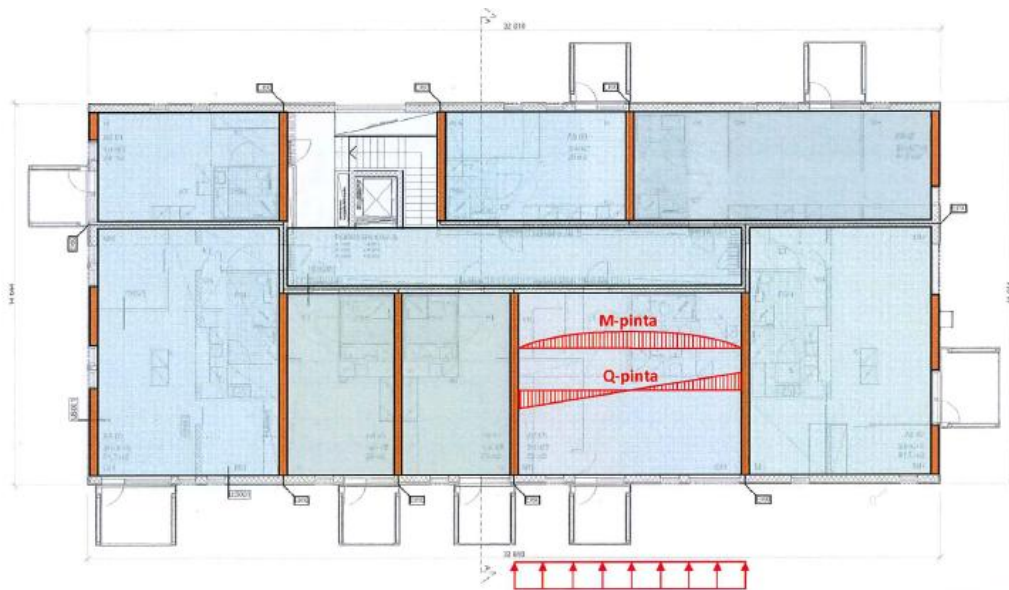


Kuva 17. Tilaelementtikylpyhuone CLT-rakenteisessa uudisrakennuksessa.

#### 7.4 Kantavat ja jäykistävät seinät

Ullakkohuoneistojen avariin pohjaratkaisujen takia tilaelementtien jäykistys voi olla hieman haastavampaa kuin mitä se on tavallisissa puukerrostalon CLT-tilaelementeissä. Jotta jäykistäviä rakenteita saataisiin riittävästi joka tilaelementtiin, täytyy tilaelementtijako tehdä ajatuksen kanssa. Rakenteet kestävät helposti sellaiseen normaalin tuulikuormien ja lisävaakavoimien jäykistykseen, mutta kuljetuksessa ja varsinkin elementin nostoissa vaaditaan huomattavasti suurempaa jäykkyyttä. Tarvittaessa tilaelementeissä voidaan käyttää kuljetuksen aikaisia lisäjäykisteitä. Lisäksi jäykistävien seinien jakoväli ei saa olla liian suuri, jotta kuormituspintana toimiva seinä kestää vaakakuormien taivuttavan voiman sekä pystykuormien yhteisvaikutuksen ja siirtymä ei kasva liian suureksi. Kuvassa 18 on esitetty erään puukerrostalon jäykistävät huoneistojen väliset seinät sekä yhden huoneiston jäykistävän välipohjan momentti- ja leikkausvoimapinnat. Koska luvussa 5.2 todettiin että kattolevyt eivät saa jatkua huoneistojen välisten seinien yli ääniteknisestä syystä, on rakennemalli tällöin yksiaukkoinen. Todellisuudessa seinien ja kattolaatan välinen liitos kerää momenttia, mutta lähteen 11 mukaan voidaan käyttää päistään nivelellisesti tuettua rakennemallia. Tällöin momentti kentässä on todellista suurempi, eli sen suhteen mitoitus on varmalla puolella. Seinien ja kattolaatan välinen kiinnitysmomentti sen sijaan tulee arvioida kiinnityksen joustavuuden perusteella. Mikäli seinän ja välipohjan siirtymät tai rasitukset ovat liian suuria, voidaan niitä pienentää jäykistävän väliseinän lisäämisellä ulkoseinän jännevälän keskelle. CLT-levyjen suuren jäykkyyden ja lujuuden ansiosta seinät kestävät

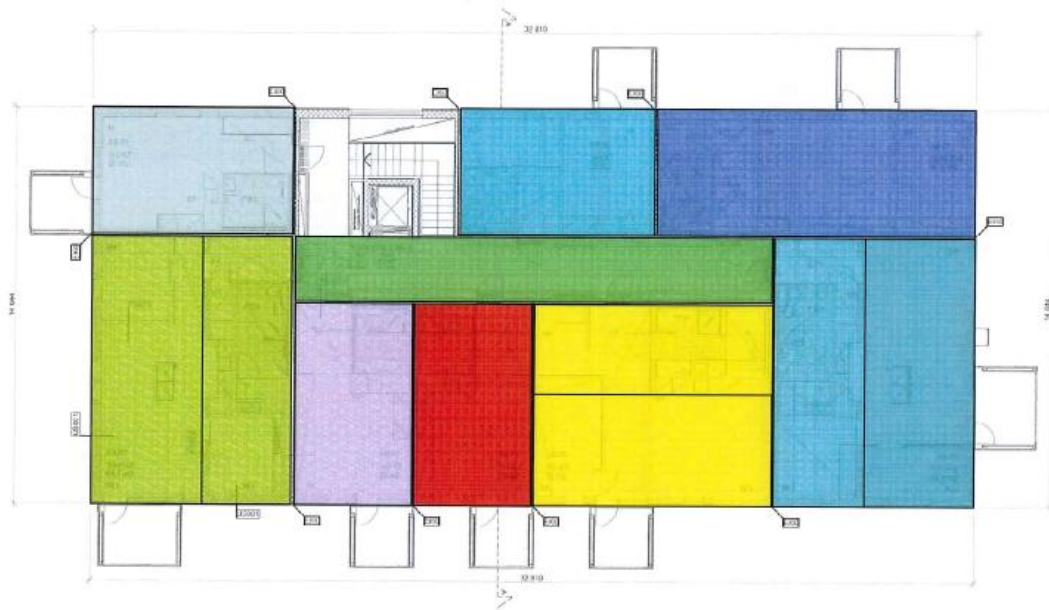
vaakakuormia erityisen hyvin, joten pitkienkään seinien toteuttamisen ei pitäisi olla ongelma.



**Kuva 18. Jäykistävien seinien jakoväli on valittava sellaiseksi, että vaakakuormien kuormituspintana toimivat seinät ja jäykistävät välipohjalaatat kestävät taivutuksen eivätkä siirry liikaa. [11.]**

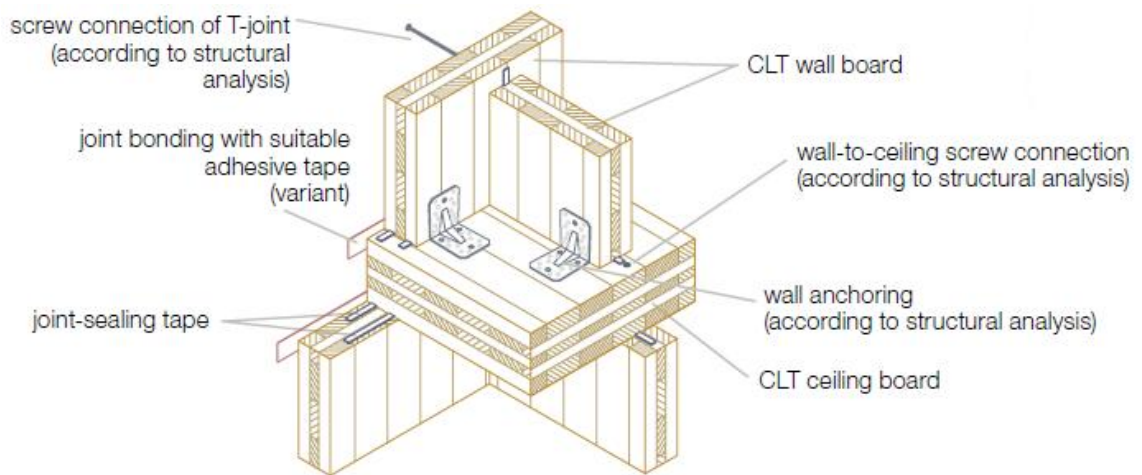
Kuten aiemmin mainittiin että väli- ja yläpohjalevyt eivät saa jatkaa huoneistojen välisen väliseinien yli, koostuu kerros siis useimmiten huoneistokohtaisista yksiköistä kuten kuvan 19 esimerkkitalossa. Tällöin jäykistys on siten laskettava huoneistokohtaisesti. Mikäli yksi huoneisto koostuu useammasta tilaelementistä, tulee niiden väliset liitokset suunnitella siten, että ne toimivat yhtenä jäykistyksessä. Kun tilaelementin jäykistävät seinät ottavat vastaan vaakakuormia, tulee ne siirtää vanhoille pystyrakenteille. Mikäli jäykistyksestä syntyvä kuorma kohdistuu välipohjan teräspalkin jänneväliille, tulee se huomioida palkkia mitoittaessa lisäkuormana normaalien hyötykuormien ja omien painojen lisäksi. Suositeltavaa olisi siis sijoitella tilaelementit siten, että niiden jäykistävien seinien päät olisivat mahdollisimman lähellä vanhoja pystyrakenteita, jolloin ne lisääisivät teräspalkkien taivutusrasitusta mahdollisimman vähän. Lisäksi jokaisen yksittäisen tilaelementin on omattava riittävä jäykkyys kuljetuksessa ja siirroissa tulevia voimia vastaan. Kuljetuksen aikana voidaan kuitenkin käyttää väliaikaisia tukia, jotka voivat olla esimerkiksi vanerilevyjä tai vaijerijäykisteitä. Kuljetuksen aikaiset tuet sijoitetaan tapauskohtaisesti esimerkiksi suurien ikkuna- tai kulkuaukkojen kohdille.

**HUOMIO!** Talo koostuu huoneistokohtaisista yksiköistä (välipohja ei ole jatkuva)



**Kuva 19.** Erään tilaelementistä kootun asuinkerrostalon tilaelementtijako. Kolme huoneistoa (vaalean vihreä, keltainen ja sininen) koostuvat kahdesta tilaelementistä, mutta kaikki huoneistot toimivat yksin jäykistävinä kokonaisuuksina. [11.]

Seinärakenteiden paksuus määräytyy niille tulevista pysty- ja vaakakuormista. Mikäli vaakakuormat pyrkivät kaatamaan seinän, tulee se ankkuroida sen alapuoliseen lattialevyyn kaatavaa voimaa vastaan kulmateräksillä kuvan 20 tapaan. Myös seinän nurjahduskestävyys tulee huomioida seinää mitoittaessa. Stora Enson sivuilla on ladattavissa taulukoita seinien mitoituksista ja myös Stora Enson sivuilta ladattavalla CLT-rakenteiden mitoitusohjelmalla voi arvioida seinälevyn kestävyttä. Mikäli seinään tukeutuu palkkeja, täytyy palkkien tukipisteiden kohdalla tarkistaa seinän leimapainekestävyys. Luvussa 7.7.4 on esitetty seinälevyjen mitoituksen perusteet ja pohdintaa myös paikallisesta puristuskestävyydestä. CLT-levyn suurimmat ulkomitat voivat olla 2,95 m x 16,00 m, joka voi asettaa rajoituksia levyjen asettelussa seinärakenteissa. CLT-seinälevyjen tulisi mieluiten ulottua koko kerroksen korkeudelle, jolloin ainoat liitokset tulisivat nurkkiin. Jos seinäkorkeus on kuitenkin yli 2,95 m, suositellaan seinä tehtäväksi pystyliitoksin ennemmin kuin vaakaliitoksin. [4.]



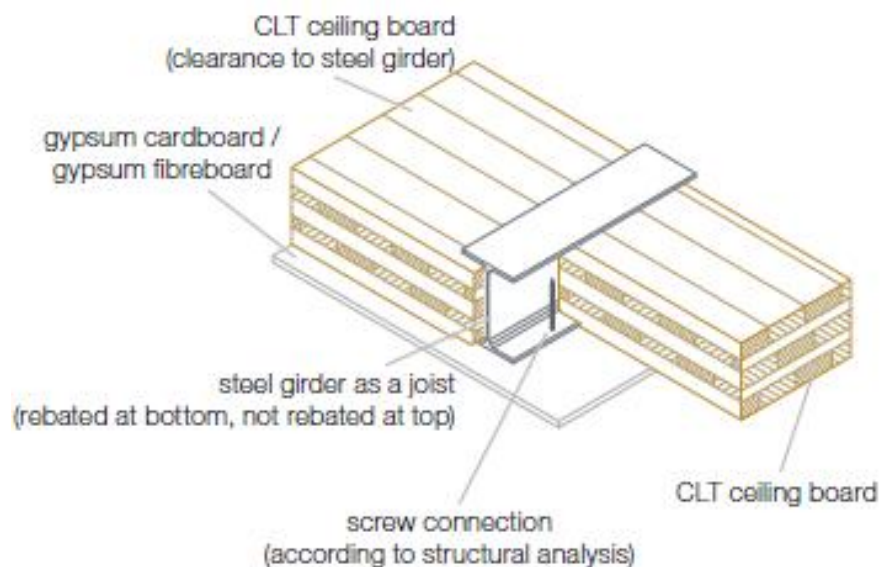
**Kuva 20. Jäykistävien seinien ankkurointi välipohjaan. Ullakkorakentamisessa alapuolisten seinien tilalla on teräspalkki. [4.]**

Seinälevyn paksuuden mitoittavaksi tekijäksi saattaa joissakin tilanteissa tulla ääneneristävyysvaatimukset, jotka on esitetty luvussa 5.2. Huoneistojen väliset väliseinät ja huoneiston ja porrashuoneen väliset väliseinät toteutetaan yksinkertaisimmin siten, että kahden CLT-levyn väliin asennetaan vähintään 50 mm mineraalivillaa ja näkyviin jäävät CLT-levyjen pinnat suojataan luvussa 5.4.2 mainitulla suojaverhouksella. RunkoPES 2.0 osassa 11 CLT-levyjen paksuus on 100 mm, mutta Stora Enson teknisessä suunnitteluohjeessa on esitetty huoneistojen välinen väliseinä myös 80 mm paksuilla levyillä, joiden välissä on 60 mm ääneneristysvillaa. RunkoPES 2.0 esittämän seinärakenteen ilmaääneneristävyys täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman vaatiman raja-arvon  $R'w=55$  dB, mutta sen ilmaääneneristävyyden tarkkaa arvoa ei ole ilmoitettu. Stora Enso esittää aiemmin mainitun ohuemman seinärakenteen ilmaääneneristävyydeksi  $R'w=60$  dB, joten myös RunkoPES 2.0 esittämän paksumman seinärakenteen ilmaääneneristävyyden on oltava todellisuudessa parempi kuin  $R'w=55$  dB. Voidaan siis todeta, että ääneneristävyyden kannalta seinälevyjen paksuudeksi riittää Stora Enson esittämä 80 mm. [4, 21.]

## 7.5 Yläpohja

Tilaelementin yläpohjan CLT-levyjen paksuus määräytyy lähinnä niiden jännevälin ja kuormien mukaan. Yläpohjan jännevälit saattavat tulla helposti suuremmiksi kuin välipohjissa, sillä teräspalkkeja voi välipohjassa aina lisätä tarpeen mukaan. Yläpohjassa taas palkkien lisääminen saattaa madaltaa huonekorkeutta kyseisellä kohdalla hyvinkin

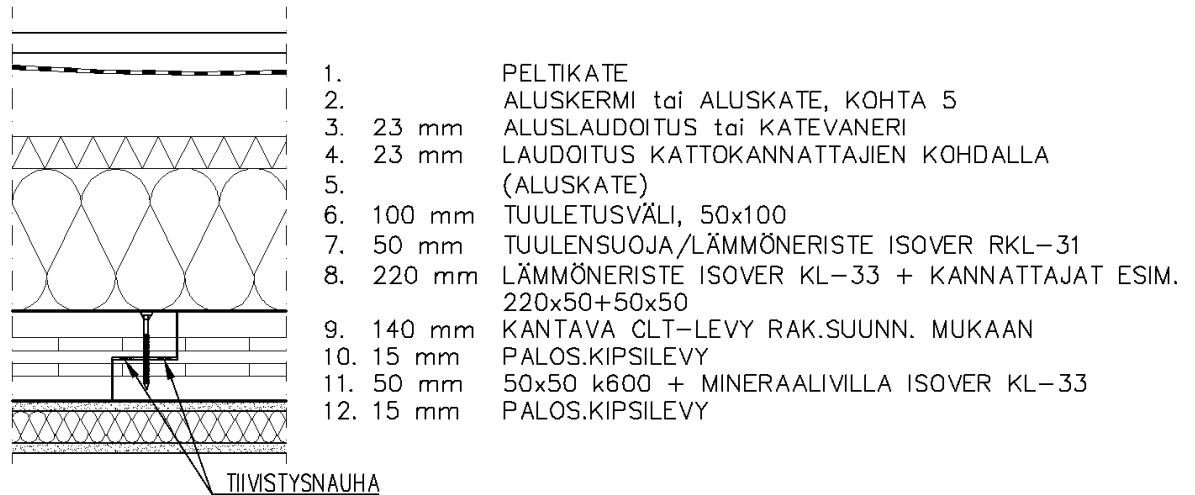
paljon ja tapauskohtaisesti saatetaan joutua lisäämään myös pilareita. Toisin sanottuna yläpohjan kantavuuden saa suuremmaksi yksinkertaisemmin paksuntamalla CLT-levyä, jolla voidaan päästä jopa noin 10 metrin jänneväleihin. Laattarakenteissa voi myös käyttää levyjen saumojen kohdilla kuvan 21 tapaan HE- tai I-teräspalkkeja, jolloin rakenteen korkeus ei juuri muutu. Esimerkiksi liitteen 1 sivulla 3 olevassa tasokuvassa on kuvattuna yläpohjan kantavat palkit ja CLT-levyjen kantosuunta. Ullakon molemmissa huoneistoissa esitetyt katossa olevat kantavat palkit voisi asentaa esimerkiksi kuvan 21 tapaan.



**Kuva 21. Kantava teräspalkki CLT-levyjen saumassa. CLT-levyn alareuna on huullettu siten, että levyn alapinta on samassa tasossa teräspalkin alapinnan kanssa. Yläpintaan vastaavaa huullosta ei ole tehty. [4.]**

Katon kantavuutta voidaan lisätä myös CLT-levyjen yläpuolelle eristetilaan tulevilla puupalkkeilla, joiden tehtävä on myös kantaa vesikaton pintarakenteet. Yläpohjan pintarakenteita kantavana rakenteena on järkevämpää käyttää palkkien sijaan matalaa NR-pukkiristikkoa, mikäli CLT-levy pystyy muutoin kantamaan kuormat itse. Puupalkkien lisäämän kantavuuden osuus riippuu pitkälti niiden liitoksesta CLT-levyn yläpintaan. Jotta palkit voidaan mitoittaa CLT-levyjen kanssa yhdistettynä poikkileikkauksena, tulee liitoksen mitoitus tehdä perusteellisesti ottaen huomioon muun muassa CLT-levyn ja palkkien välinen liukuma. Palkin ja levyn välinen liukuma huomioidaan liitoshyötyker-toimella  $\gamma$ , jota käytetään myös itse CLT-levyn eri lamellikerrosten välillä luvussa 7.7.2. Kun mitoittaa yläpohjan CLT-levyä, tulee ottaa huomioon myös elementtisaumojen sijainnit ja kuinka ne toteutetaan. Saumojen tulee olla sellaisia, että rakenteiden siirty-

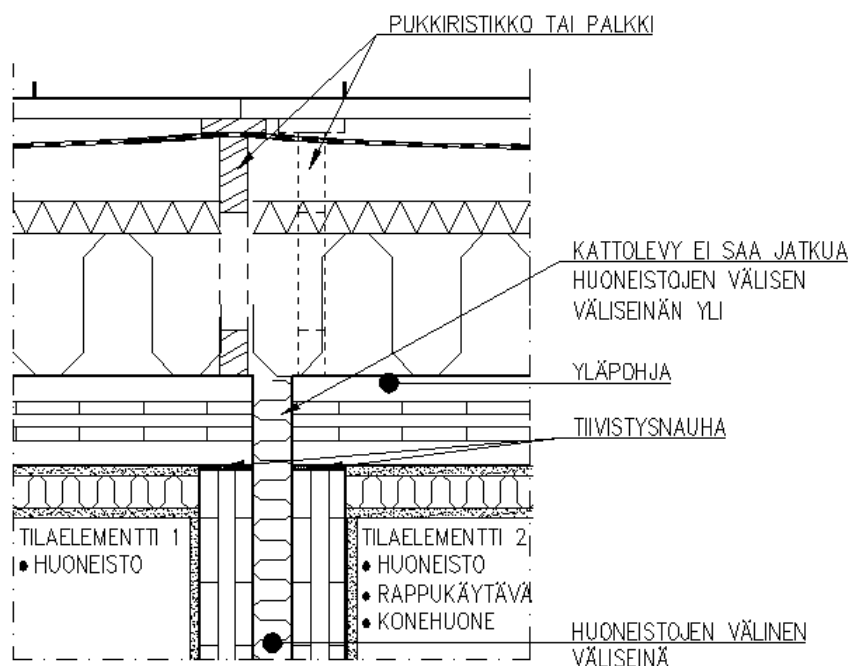
essä ne säilyttävät ilmatiivytensä. Levyt voidaan liittää toisiinsa esimerkiksi leukaliitoksella kuvan 21 tapaan. Runkoäänien kulkeutumisen estäminen tulee huomioida yläpohjassa samalla tavalla kuin välipohjassakin; CLT-levy ei saa jatkaa huoneistojen välisen väliseinän yli kuvan 22 mukaisesti.



**Kuva 22. Katon kantavien CLT-levyjen liityksi.**

Tilaelementtien suositeltu kokonaiskorkeus 3,2 m saattaa ylittyä helposti ullakkorakentamisessa. Kattorakenteiden osuus kokonaiskorkeudesta jo ilman CLT-levyn mukaan laskemista on huomattava. Jos kattorakenteet tehdään vasta työmaalla, on kuljetuksen aikainen korkeus tällöin lähempänä tilaelementin suositeltua enimmäiskorkeutta 3,2 metriä. Vesikattorakenteita ei pysty tekemään kauttaaltaan tehtaalla missään tilanteessa. Esimerkiksi elementtien saumakohtat on jätettävä auki ainakin yhden kattopalkkivälin verran, jotta aluskatteet ja pintakermit saadaan limitettyä työmaalla ja liitoksesta saadaan tiivis. Mahdollisimman valmis vesikattorakenne nopeuttaa rakentamista, mutta mikäli sitä ei korkeuden takia voi tehtaalla tehdä, voi sen tehdä myös työmaalla. Esimerkiksi kuvassa 23 esitetään, että jos kattopalkit ja eristeet asennettaisiin pääosin jo tehtaalla, tulisi elementin ulkoreunoille asentaa palkit tai jättää koko reuna-alueen palkkiväli rakentamatta. Mikäli CLT-levyn yläpuoliset rakenteet tehdään vasta työmaalla, voidaan palkkijako tehdä kuvan osoittamalla tavalla. Tällöin katkoviivalla olevaa palkkia tai pukkiristikkoa ei tarvita ja kapeaa huonosti tuulettuvaa rakoa ei synny palkkien tai ristikon yläpaarten väliin. Toisaalta jos palkkien halutaan toimivan CLT-levyn kanssa yhdistettynä poikkileikkauksena, tulee ne kiinnittää CLT-levyihin erittäin tiheällä kiinnikkeiden jakovälillä. Työmaalla tiheiden kiinnitysten teko saattaa viedä aikaa taas paljon enemmän mitä se tehtaalla veisi ja se tuo työmaalle lisää yhden työvaiheen. Lisäksi

tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää ratkaisu, joka lyhentäisi vesikaton aukioloaikaa. Joten voisi suoraan todeta, että mikäli kattopalkit asennetaan vasta työmaalla, ei niitä välttämättä kannata mitoittaa CLT-levyn kanssa yhdistettynä poikkileikkauksena, vaan lasketaan pelkän CLT-levyn kantavan kaiken kuorman. Mikäli palkit vain välittävät kuorman kantavalle CLT-levylle, on järkevämpää käyttää aiemmin tässä luvussa mainittua pukkiristikkoa. Yhtenä vaihtoehtona joissakin kohteissa voi käyttää katon harjalle erikseen asennettavaa lautarakenteista elementtiä, jonka sisällä voi olla myös talotekniikkaa. Esimerkiksi liitteessä 5 esitetty Sturenkadun mallikohteen korkeus olisi sellaisenaan liian korkea, kuten luvussa 4.2 todettiin. Harjalle erikseen asennettavalla elementillä korkeus olisi kuitenkin huomattavasti matalampi ja samalla saataisiin talotekniikalle sopiva asennustila.



**Kuva 23. Huoneistojen välisen väliseinän liitos yläpohjaan.**

## 7.6 Uudet kantavat teräspalkit

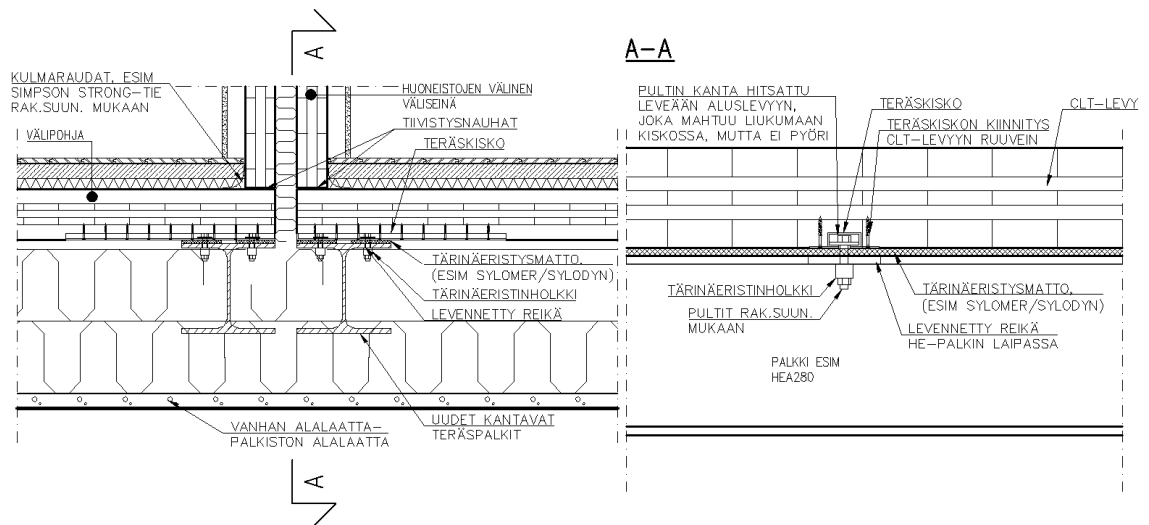
Vanhaa yläpohjaa ei ole todennäköisesti alun perin suunniteltu kantamaan kovin suuria kuormia, kuten CLT-tilaelementtejä ja nykyisten standardien mukaisia asuintilojen hyötykuormia. Kun ullakko muutetaan asuinkäyttöön, tarvitsee ylimmän asuinkerroksen ja ullakon välistä välipohjarakennetta vahvistaa. Vahvistaminen onnistuu yksinkertaisesti poistamalla alalaattapalkiston päällä olevat puiset rakenteet ja palopermanto, jonka

jälkeen vanhojen teräsbetonipalkkien väliin voidaan asentaa uusia teräspalkkeja. Tällöin lattiarakenteen paksuus ei kasva paljon enempää kuin CLT-rakenteen paksuuden verran. Uudet kantavat teräspalkit tukeutuvat ulkoseinillä vanhaan tiilimuuriin ja rakennuksen keskellä kantavaan seinälinjaan tai pilareihin. Teräspalkkeja ja niiden jakovälejä mitoittaessa on otettava huomioon käytettävissä oleva vapaa tila sekä palkkien sallittu taipuma ja uuden tilaelementin lattiarakenteen CLT-levyjen jänneväli.

Tämän opinnäytetyön yhtenä tuloksena koottiin liitteen 9 tapaisia teräspalkkien jakovälien ja pituuksien mukaan palkkien alkumitoituskäyrästä, joista näkee nopeasti mikä teräspalkin profiilin milläkin jakovälillä tulisi olla. Käyrästä huomioivat palkkien leikkaus- ja taivutuskestävyyden sekä sallitun taipuman. Lisäksi samasta aiheesta tehtiin Excel -pohjainen mitoitus taulukko, joka huomioi samat asiat kuin käyrät, mutta siihen voi syöttää myös haluamansa kuorman. Lisäksi taulukossa on esisytetty hieman useamman eri teräspalkin tiedot, kuin mitä mitoituskäyrissä on. Käyrästä ja taulukkoa käytetään hankesuunnitteluvaiheessa, kun tarvitaan vain arvio palkkien määrästä ja tilaelementtijaoista.

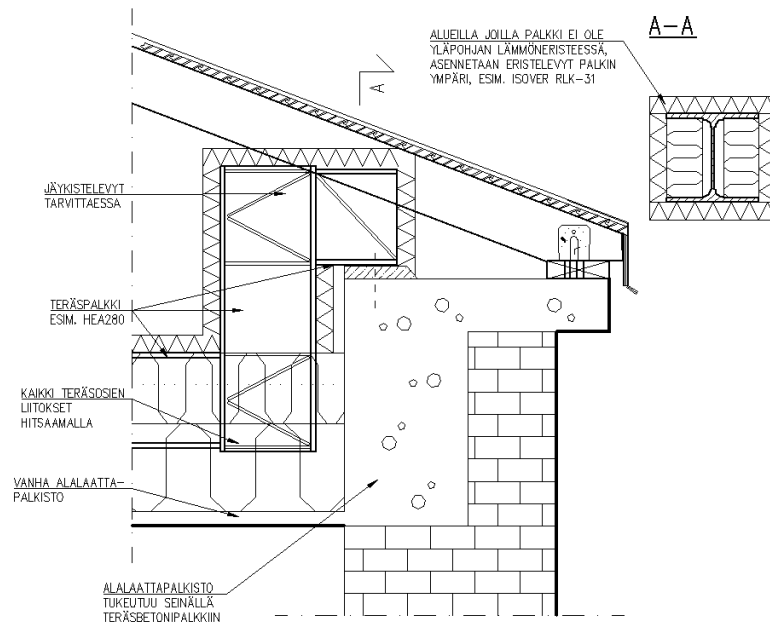
Rakentamista voitaisiin nopeuttaa kiinnittämällä teräspalkit tilaelementteihin jo elementteilla. Tämä kuitenkin edellyttää, että tilaelementin kokonaiskorkeus ja pituus pysyy sallituissa rajoissa. Teräspalkkien kiinnitys CLT-levyihin voidaan tehdä esimerkiksi kuvan 24 osoittamalla tavalla levyyn upotetun teräskiskon avulla. Lisäksi teräspalkin laippaan voidaan tehdä levennetyt reiät, jolloin palkkia pystyy liikuttamaan työmaalla molempiin suuntiin ja palkki saadaan istumaan sille sopivaan paikkaan helposti. Kun palkki on asetettu sopivaan kohtaan, kiristetään CLT-levyn ja teräspalkin laipan välinen liitos. Liitoksessa mutterin ja teräspalkin laipan välissä voidaan käyttää värinäeristinholkkia, joka estää runkoäänien kulkeutumisen liitoksen kautta. Holkin lisäksi myös teräspalkin ja CLT-levyn välissä tulee käyttää värinäeristysmattoa, kuten Sylomer tai Sylodyn. Liitteen 1 ensimmäisellä sivulla on esitetty erään asuinkerrostalon mahdollinen tilaelementtijako. Mikäli teräspalkit sijoitetaan elementtien pituussuunnassa liitteen 1 sivun 2 mukaisesti, voidaan ne asentaa jo tehtaalla joka elementin reunoille. Tällöin tilaelementtien saumakohdissa voi olla aina kaksi palkkia vierekkäin, jolloin runkoäänien kulkeutuminen palkin kautta estyy. Tällöin myös profiilin ei tarvitse olla niin järeä kuin jos se kantaisi kuormaa kahdelta elementiltä. Joissakin tapauksissa voitaisiin myös käyttää kuvan 21 ratkaisua, jossa teräspalkki on CLT-levyjen saumassa. Jotta palkki ja koko elementti saadaan asennettua vaakatasoon, valetaan tukipisteillä van-

han rakenteen päälle tasausvalu ja tarvittaessa voidaan tasaukseen käyttää esimerkiksi kiiloja.



**Kuva 24. Uusien kantavien teräspalkkien liitos CLT-levyihin. Vasemmassa kuvassa leikkaus huoneistojen välisen väliseinän kohdalla.**

Teräspalkkien kiinnitys tuilla tulee suunnitella aina tapauskohtaisesti. Vanhaan rakenteeseen tuettaessa on kuitenkin ensisijaisen tärkeää, että vanha rakenne ei rikkoudu uusista kuormista. Vanhojen materiaalien lujuuksia arvioitaessa onkin käytettävä aina riittävää varmuutta. Alalaattapalkisto tukeutuu ulkoseinällä tiilimuuraukseen upotettuun teräsbetonipalkkiin. Mikäli teräspalkille ei voi tehdä koloa betonipalkkiin tai kiinnitys teräskonsolilla ja kemiallisilla ankkureilla ei ole mahdollista, voidaan teräspalkin päähän hitsata samasta profiilista L-kirjaimen muotoinen pala, joka tukeutuu ulkoseinällä seinän palkin päälle, kuten kuvassa 25 on esitetty. Mikäli vanhan rakenteen pintaa voidaan purkaa, on teräspalkin tuenta yksinkertaisempi. Tällöin puretun rakenteen pintaan tehdään tasausvalu ja palkki asennetaan sen päälle tarvittaessa kiilojen avulla.



**Kuva 25. Teräspalkin liitos ulkoseinään vanhoja rakenteita rikkomatta. Ulkoilmassa olevat teräsosat on vuorattava eristelevyillä, jotta niiden pinnalle ei tiivistyisi kosteutta. Lisäksi eristelevyt toimivat palkin palosuojauksena. Liitteen 1 sivulla 4 on esitetty koko ullakon leikkauskuvat.**

## 7.7 CLT-rakenteiden mitoittaminen

### 7.7.1 Yleistä mitoituksesta

CLT-levyjä käytetään pääosin kuormia kantavina ja jäykistävinä levyrakenteina lattioissa, katossa ja seinissä. Levyt voidaan suunnitella joko yhteen tai kahteen suuntaan kantaviksi. Laattarakenteita suunniteltaessa tulee tarkistaa ainakin seuraavat asiat:

- Taivutus- ja leikkauslujuus sekä jäykkyys.
- Lyhyt- ja pitkäaikainen käyttäytyminen:
  - Hetkelliset siirtymät
  - Pitkäaikaislujuus pysyville kuormille
  - Pitkäaikaissiirtymät viruminen huomioiden
- Värähtely lattiarakenteissa

- Syitä vastaan kohtisuora paikallinen puristuskestävyys
- Palomitoitus
- Äänitekkinen toiminta
- Käyttöikä.

Seinärakenteissa taas tärkeintä on tarkistaa seinälevyn kestävyys puristaville normaali-voimille yhdessä nurjahduksen ja vaakakuormien kanssa. Lisäksi tärkeitä suunnittelussa huomioon otettavia asioita myös seinärakenteissa ovat palomitoitus, äänitekkinen toiminta ja käyttöikä. [24.]

FPInnovations handbook:n kaavoissa materiaalien lujuuksissa käytetään ylimääräistä  $\emptyset$ -kerrointa ( $\emptyset = 0,9$ ), jota ei taas RIL 205-1-2009 CLT päivitykset -ohjeen kaavoissa ole. Kerrointa ei määritelty kaavoissa lainkaan, joten se on todennäköisesti Kanadassa käytettävä osavarmuuskerroin. Suomessa varmuuskerroin otetaan huomioon materiaalin lujuutta laskettaessa kuten muissakin puurakenteissa. Esimerkiksi materiaalin ominaistaivutuslujuus  $f_{m,k}$  jaetaan CLT:n osavarmuusluvulla  $\gamma_M = 1,25$  ja kerrotaan kuorman aikavaikutuskertoimella  $k_{mod}$ , joka määritetään rakenteen käyttöluokan ja kuorman aikaluokan perusteella kuten muissakin puurakenteissa. CLT-rakenteiden suunnittelussa käytettävät aikavaikutus- ja virumakertoimet sekä aiemmin mainittu osavarmuusluku on määritelty RIL 205-1-2009 CLT päivitykset -ohjeessa. Taulukossa 4 on esitetty  $k_{mod}$  -kertoimet CLT-levylle.

**Taulukko 4. RIL 205-1-2009 CLT-päivitykset lisäkirjeen mukaan CLT sijoittuu  $k_{mod}$  -kertoimen määrittävässä RIL 205-1-2009 taulukossa 3.1 samaan laatikkoon muun muassa sahatavaran ja liimapuun kanssa. [25.]**

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka		
		Pysyvä	Keskipitkä	Hetkellinen
Sahatavara, pyöreä puu, liimapuu, LVL, vaneri, CLT	1	0,60	0,80	1,10
	2	0,60	0,80	1,10
	3	0,50	0,65	0,90

Puurakenteiden pitkäaikaistaipumia laskettaessa rakenteen viruma huomioidaan virumakertoimella  $k_{def}$ , joka määräytyy rakenteen käyttöluokan perusteella taulukon 5 mukaan.

**Taulukko 5. CLT-rakenteiden virumakerroin  $k_{def}$  on riippuvainen levyn asennosta. Syrjällään asennettuna se kuuluu samaan luokkaan kuin sahatavara ja lappeellaan se kuuluu samaan luokkaan muun muassa vanerin kanssa. [25.]**

Materiaali	Käyttöluokka		
	1	2	3
Sahatavara, pyöreä puu, liimapuu, LVL, CLT syrjällään	0,60	0,80	2,00
Vaneri, kerto-Q lappeellaan, CLT lappeellaan	0,80	1,00	2,50

CLT-rakenteet tehdään yleensä kuusi- tai mäntylautoista liimaamalla, joiden lujuusluokka on C16 – C40. Lujuusluokkien mukaiset lujuuksien ominaisarvot EN 338:2009 -standardin mukaan on esitetty taulukossa 6. [24, 25.]

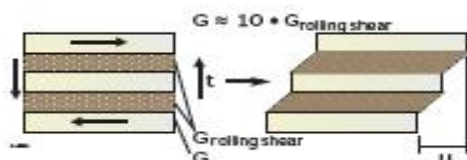
**Taulukko 6. CLT-rakenteiden mitoituksessa käytettävät lujuuksien ominaisarvot EN 338:2009 mukaan.**

		C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	
Taivutuslujuus	$f_{m,k}$	16	18	20	22	24	27	30	35	40	N/mm <sup>2</sup>
Syiden suuntainen vetolujuus	$f_{t,0,k}$	10	11	12	13	14	16	18	21	24	N/mm <sup>2</sup>
Syitä vastaan kohtisuora vetolujuus	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	N/mm <sup>2</sup>
Syiden suuntainen puristuslujuus	$f_{c,0,k}$	17	18	19	20	21	22	23	25	26	N/mm <sup>2</sup>
Syitä vastaan kohtisuora puristuslujuus	$f_{c,90,k}$	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	N/mm <sup>2</sup>
Leikkauslujuus	$f_{v,k}$	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4	N/mm <sup>2</sup>
Keskimääräinen kimmo-kerroin syysuuntaan	$E_{0,mean}$	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	kN/mm <sup>2</sup>
Syysuuntaisen kimmo-kerroimen 5% fraktiilia vastaava arvo	$E_{0,05}$	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	kN/mm <sup>2</sup>
Keskimääräinen kimmo-kerroin kohtisuoraan syysuuntaa vastaan	$E_{90,mean}$	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	kN/mm <sup>2</sup>
Liukukertoimen keskiarvo	$G_{mean}$	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	kN/mm <sup>2</sup>
CLT:n poikittaisen kerroksen tasoleikkausmoduulin keskiarvo	$G_{R,mean}$ kuusi	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	kN/mm <sup>2</sup>
	$G_{R,mean}$ mänty	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	kN/mm <sup>2</sup>

CLT-levy koostuu risteävistä toisiinsa liimatuista laudoista. Näiden liimasaumojen vääntöleikkauslujuudelle voidaan RIL 205-1-2009 mukaan käyttää ominaisarvoa  $f_{tV,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ . CLT:n nettopoikkileikkauksen leikkauslujuudelle voidaan käyttää ominaisarvoa  $f_{v,net,k} = 8,0 \text{ N/mm}^2$  ja poikittaisen kerroksen tasoleikkauslujuudelle (rolling shear) käytetään ominaisarvoa  $f_{R,k} = 1,25 \text{ N/mm}^2$ , kun materiaali on kuusi- tai pihtalautaa ja  $f_{R,k} = 1,50 \text{ N/mm}^2$ , kun kyseessä on mäntylauta. [25.]

### 7.7.2 Laattojen mitoittaminen

Euroopassa käytetään useita eri mitoitusmenetelmiä CLT-levyjen ominaisuuksien määrittämiseksi. Osa menetelmistä on täysin analyyttisiä ja osa taas perustuu kokeisiin. Kokeellisissa menetelmissä on ongelmana se, että aina kun testattavan tuotteen materiaalin ominaisuudet tai valmistusparametrit muuttuvat, joudutaan tekemään testauksia uudelleen. Analyyttisten menetelmien paikkansapitävyys tulee myös testata, mutta kun ne on kertaalleen todettu riittävän tarkoin, voidaan niitä käyttää yleisesti monissa tapauksissa. Yleisin analyyttinen menetelmä Euroopassa on Eurokoodin EN 1995-1 liitteessä B esitetty mekaanisin liittimin koottujen palkkien mitoitusmenetelmä, joka ei käytännössä poikkea muista puurakenteiden mitoittamisesta muuten kuin liittoshyötysuhdekertoimen  $\gamma$  huomioimisella. Menetelmässä määritetään CLT-levyn tehollinen taivutusjäykkyys levyn lamellien kantosuuntien, poikkipinta-alojen ja kimmokerrointen sekä liittoshyötysuhdekertoimen avulla. Liitoshyötysuhdekerroin  $\gamma_i$  huomioi kohtisuoran kerroksen leikkausmuodonmuutoksen. Kerroin saa arvon väliltä 0...1 siten, että kun  $\gamma=1,0$  on liitos täysin jäykkä ja kun  $\gamma=0$  ei liitosta ole kiinnitetty lainkaan.  $\gamma$ -kerroin perustuu poikittaisten kerrosten liukukertoimen  $G_R$  ja pitkittäisten kerrosten liukukertoimen  $G$  eroavaisuuksiin. Kuvassa 26 näkyy, kuinka poikittaiset kerrokset pyrkivät siirtymään tasoleikkausrasituksista johtuen, koska niiden liukukerroin on noin kymmenen kertaa pienempi kuin pitkittäisten lamellien. Menetelmän avulla voidaan laskea kuitenkin vain yksinkertaisesti tuettuja sinimuotoisesti kuormitettuja laatta ja palkkirakenteita. [24.]



Kuva 26.  $\gamma$ -kerroin perustuu poikittaisten kerrosten liukukertoimen  $G_R$  ja pitkittäisten kerrosten liukukertoimen  $G$  eroavaisuuksiin. Kuvassa näkyy, kuinka poikittaiset kerrokset pyrkivät siirtymään tasoleikkausrasituksista johtuen. [24.]

Seuraavat kaavat ja laskelmat perustuvat FPInnovations CLT-handbook:ssa esitettyihin mitoitusohjeisiin ja kaavoihin.

### Tehollisen taivutusjäykkyyden laskenta

Tehollinen taivutusjäykkyys lasketaan kaavalla 1

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (1)$$

$$(EI)_{eff} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2) + (E_3 I_3 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2) \quad (1)$$

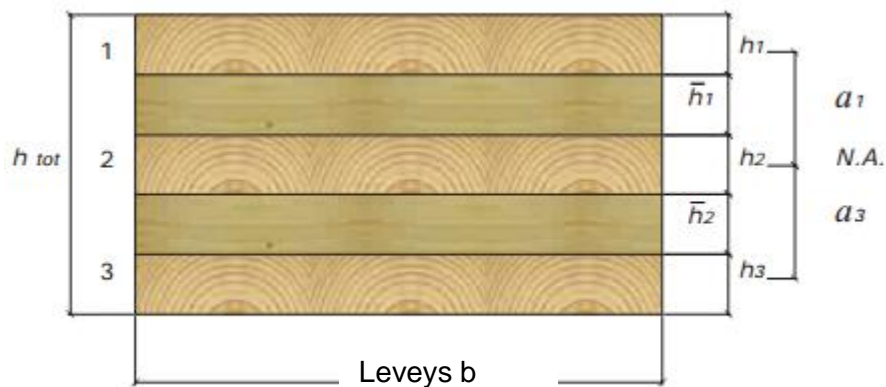
$E_i$  on lamellikerroksen kimmomoduuli [MPa.]

$I_i$  on lamellikerroksen jäyhyysmomentti [ $mm^4$ .]

$\gamma_i$  on liitoshyötysuhdekerroin

$A_i$  on lamellikerroksen pinta-ala [ $mm^2$ .]

$a_i$  on etäisyys lamellikerroksen keskeltä keskimmäisen lamellikerroksen keskelle [mm.]



Kuva 27. Viisilamellisen CLT-levyn poikkileikkauksen mitat ja symbolit. [24.]

Kuvan 27 esimerkkitapauksessa voidaan todeta seuraavat asiat:

$$A_1 = A_3$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{b_1 h_1^3}{12}$$

$$a_2 = 0$$

$$a_1 = a_3 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

$$\gamma_1 = \gamma_3$$

$$\gamma_2 = 1$$

Tällöin kaava 1 voidaan supistaa muotoon

$$(EI)_{eff} = E(I_1 + \gamma_1 A_1 a_1^2) + (I_2) + (I_3 + \gamma_3 A_3 a_3^2) \quad (1)$$

$$(EI)_{eff} = EI \left( 1 + \frac{\gamma_1 A a^2}{I} \right) + 1 + \left( 1 + \frac{\gamma_1 A a^2}{I} \right) \quad (1)$$

$$(EI)_{eff} = EI \left( 3 + 2 * \frac{\gamma_1 A a^2}{I} \right) \quad (1)$$

Kaavan 1 tuntemattomat arvot ( $\gamma_1$ ,  $A$ ,  $a$  ja  $I$ ) lasketaan seuraavilla kaavoilla

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EA}{I^2} * \frac{\bar{h}}{G_r * b}}$$

$$A = b * h$$

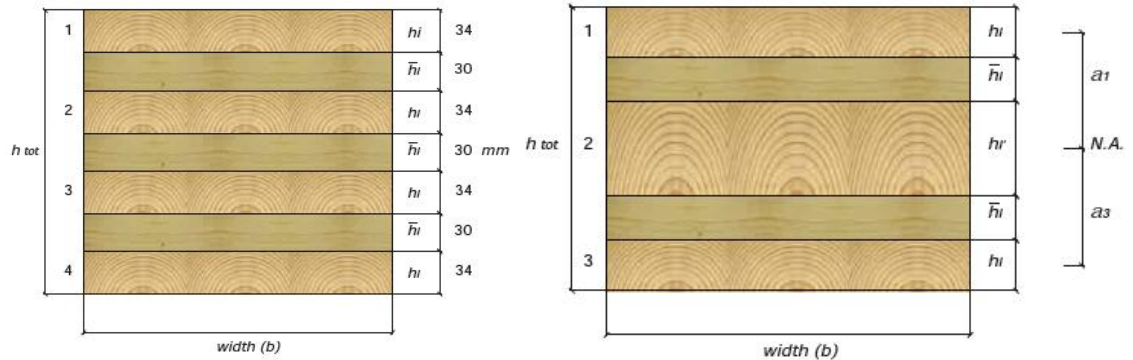
$$a = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Edellä oleva tehollisen taivutusjäykkyyden laskenta koskee vain viiden lamellikerroksen omaavia CLT-levyjä. Mikäli lamelleja olisi esimerkiksi seitsemän, laskenta etenisi hie-  
man eri tavalla. Tällöin tehollinen taivutusjäykkyys saataisiin kaavasta 2.

$$(EI)_{eff} = EI(1) - EI(2) + EI(3) \quad (2)$$

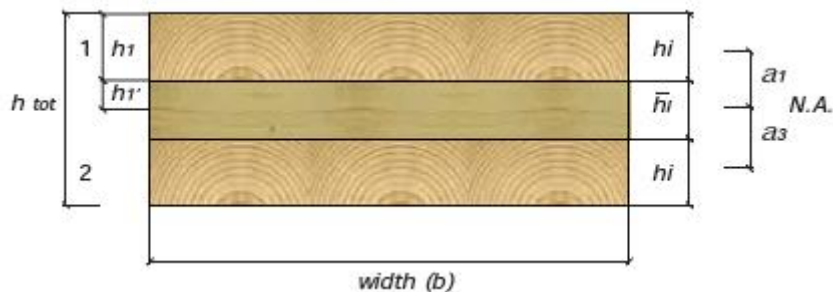
$EI(1)$  on viiden kerroksen poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys. Kuten kuvassa 28 esitetään, seitsemänlamellinen poikkileikkaus muutetaan kuvan oikean puoleiseksi viisilamelliseksi poikkileikkaukseksi. Muutetun poikkileikkauksen keskimäinen lamelli on yhdistelmä, jossa on laskettu yhteen kaksi pitkittäistä ja yksi poikittainen lamelli.



Kuva 28. Kaavassa 2 oleva taivutusjäykkyys  $EI(1)$  lasketaan kuvan mukaisesta oikean puoleisesta poikkileikkauksesta. Vasemman puoleinen poikkileikkaus on seitsemänlamellisen levyn poikkileikkaus. [24.]

$EI(2)$  on kolmen keskellä olevan yhdistetyn lamellin poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys. Eli kuvan 28 oikeanpuoleisen poikkileikkauksen keskimäisen lamellin taivutusjäykkyys yksin.

$EI(3)$  on kuvan 29 mukaisten kolmen keskimäisen lamellin poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys. Eli samojen lamellien, jotka  $EI(1)$ :n laskennassa yhdistettiin keskenään.



Kuva 29. Kaavassa 2 oleva taivutusjäykkyys  $EI(3)$  lasketaan kuvan mukaisesta poikkileikkauksesta. [24.]

## Taivutuskestävyyden laskenta

CLT-levyn taivutuskestävyys lasketaan kaavalla 3

$$M_r = f_{m,d} \frac{I_{eff}}{\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1} \quad (E_1 = E_2 = E_3) \quad (3)$$

Vaihtoehtoisesti taivutuskestävyys voidaan laskea seuraavalla yksinkertaistetulla kaavalla.

$$M_r = f_{m,d} \frac{I_{eff}}{0,5 h_{tot}} \quad (3)$$

## Taivutusjännitysten laskenta

Taivutettuun CLT-levyyn syntyvät jännitykset lasketaan kaavasta 4

$$\sigma_{max} = \sigma_{global} + \sigma_{local} \quad (4)$$

Kaavassa 4  $\sigma_{local}$  on ulkokerroksessa taivutuksesta aiheutuva taivutusjännitys ja  $\sigma_{global}$  taas on taivutuksesta aiheutuva normaalijännitys ulkokerroksessa. Kyseiset jännitykset lasketaan kaavoilla 5 ja 6.

$$\sigma_{global} = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M}{(EI)_{eff}} \quad (5)$$

$$\sigma_{local} = \frac{0,5 E_1 h_1 M}{(EI)_{eff}} \quad (6)$$

Kaavassa 5 oleva termi  $a_1$  on reunimmaisen lamellin etäisyys keskeltä keskimmäisen lamellin keskelle ja kaavassa 6 oleva termi  $h_1$  on uloimman lamellin paksuus. Suurin taivutusjännitys saadaan tällöin kaavasta 7, joka voidaan supistaa myös kaavan 8 muotoon.

$$\sigma_{max} = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M}{(EI)_{eff}} + \frac{0,5 E_1 h_1 M}{(EI)_{eff}} \quad (7)$$

$$\sigma_{max} = \frac{E_1 M}{(EI)_{eff}} * (\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1) \quad (8)$$

Mikäli kimmokerroin  $E$  on kaikilla pitkittäisillä lamelleilla sama, voidaan taivutusjännityksen kaava supistaa vielä kaavan 9 muotoon

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I_{eff}} * (\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1) \quad (9)$$

CLT-levyssä suurimman taivutusjännityksen ehtona on

$$\sigma_{max} \leq f_{m,d}$$

### Leikkauskestävyyden laskenta

Tavallisesti puupalkkien leikkausjännitys lasketaan kaavalla 10.

$$\tau = \frac{1,5 * V}{A_{brutto}} \quad (10)$$

$\tau$  on leikkausjännityslujuuden maksimi [MPa.]

$V$  on leikkausvoiman maksimi [N.]

$A_{brutto}$  on poikkileikkauksen pinta-ala =  $b * h_{tot}$  (mm<sup>2</sup>)

Mekaanisin liittimin koottujen palkkien laskentateorian mukaan leikkausvoimasta syntyvä leikkausjännitys on suurin kun normaalijännitystä ei ole. Tällöin suurin leikkausjännitys saadaan kaavasta 11. Liitteen 6 laskentaesimerkin lopussa on myös laskettu levyn leikkausjännitykset molemmilla kaavoilla. Kaavasta 10 saatu tulos on hieman suurempi, joten sitä käyttämällä mitoitus johtaa suurempiin levypaksuuksiin.

$$\tau = \frac{V * (EQ)}{(EI)_{eff} * b} \quad (11)$$

$\tau$  on leikkausjännitys [MPa.]

$V$  on maksimileikkausvoima [N.]

$Q$  on poikkileikkauksen staattinen momentti [mm<sup>3</sup>.]

$b$  on poikkileikkauksen leveys kohtisuoraan leikkausmuodonmuutokseen nähden, laattarakenteissa yleensä käytetään 1000 mm

Staattisen momentin suuruus riippuu levyn lamellien paksuuksista ja lukumääristä. Staattista momenttia käsitellään yhdessä kimmokertoimen  $E$  kanssa, sillä eri lamellien kimmokerroin vaihtelee rakenteen sisällä ja kaavassa joka lamellikerrosten osat kerrotaan niille ominaisella kimmokertoimella. Viisilamellisessa CLT-levyssä staattinen momentti saadaan kaavasta 12.

$$(EQ) = \gamma_1 E_1 A_1 a_1 + E'_1 A'_1 a'_1 + \gamma_2 E_2 \frac{A_2 h_2}{2} \quad (12)$$

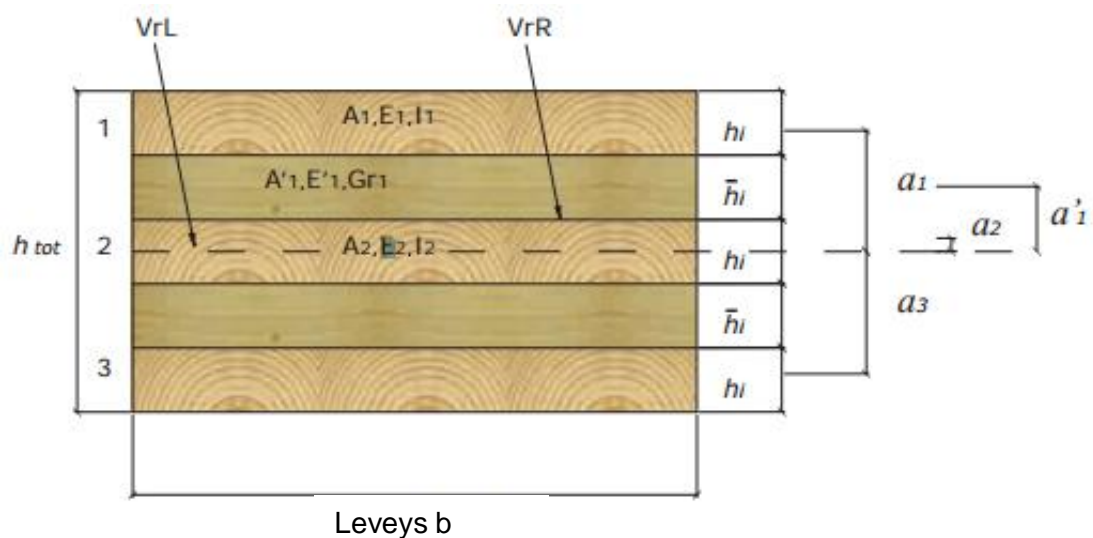
Leikkausjännitykset tulee rajata arvoon.

$$\tau \leq f_{v,d} \quad (13)$$

Kaavat 11, 12 ja 13 yhdistämällä saadaan pitkittäinen kaavan 14 mukainen leikkauskestävyys  $V_{rL}$ .

$$V_{rL} = \frac{f_{v,d} * (EI)_{eff} * b}{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 + E'_1 A'_1 a'_1 + \gamma_2 E_2 \frac{A_2 h_2}{2}} \quad (14)$$

Samoja kaavoja voidaan soveltaa myös kolme- ja seitsemänlamellisten levyjen leikkauskestävyyden laskennassa. Kolmelamellisissa levyissä leikkauslujuus  $f_{v,k}$  tulisi korvata tasoleikkauslujuudella (*rolling shear strength*)  $f_{R,k}$ . Jos levy koostuu viidestä tai useammasta lamellista, tulee leikkausvoiman kestävyys tarkistaa myös keskimmäisen ja sen viereisen lamellin välisessä saumassa, kuten kuvassa 30 osoitetaan. [24.]



Kuva 30. Viisilamellisen CLT-levyn poikkileikkaus. Leikkausvoima  $V_{rL}$  levyn keskellä ja  $V_{rR}$  keskilinjaa lähinnä olevassa saumassa tulee tarkistaa. [24.]

Sauman leikkauskestävyyttä laskettaessa tulee ensin määrittää keskimmäisen lamellin yläpuolisen sauman yläpuolelle jäävän alueen staattinen momentti sauman suhteen. Tämä tehdään kaavan 15 avulla.

$$(EQ) = \gamma_1 E_1 A_1 \left( a_1 - \frac{h_2}{2} \right) + E'_1 A'_1 \left( a'_1 - \frac{h_2}{2} \right) \quad (15)$$

Staattisen momentin ja lujuuden  $f_{tv,d}$  avulla saadaan sauman leikkauslujuudeksi.

$$V_{rR} = \frac{f_{tv,d} \cdot (EI)_{eff} \cdot b}{\gamma_1 E_1 A_1 \left( a_1 - \frac{h_2}{2} \right) + E'_1 A'_1 \left( a'_1 - \frac{h_2}{2} \right)} \quad (16)$$

CLT-levyn lopullinen leikkauskestävyys  $V_d$  on tällöin pienempi arvoista.

$$V_d = \min(V_{rL}, V_{rR}) \quad (17)$$

Liitteessä 6 on esitetty CLT-laatan tehollisen taivutusjäykkyyden sekä taivutus- ja leikkauslujuuksien laskentaesimerkki [24].

Edellisissä kaavoissa käytetty liitoshyötysuhdekerroin  $\gamma_i$  saa laskennassa arvoja, jotka ovat hyvin lähellä yhtä. Esimerkiksi liitteessä 6 lasketun viisilamellisen laatan tapauksessa liitoshyötysuhdekerroin saa arvon  $\gamma_1 = 0,937$ . Kertoimen suuruus riippuu lamellien paksuuksista ja CLT:n poikittaisen kerroksen tasoleikkausmoduulista  $G_{R,mean}$ , joka on materiaalista riippuva vakio. Eri CLT-poikkileikkauksilla on siis eri liitoshyötysuhdekerroimet. Kokeilemalla eri lamellikerrosten paksuuksia viisi- ja seitsemänlamellisilla levyillä selvisi, että vaikka kertoimena käytettäisiin joka kerroksessa  $\gamma_i = 1,0$ , ovat taivutusmomentin kestävyudet vain korkeintaan noin 2 % ylisuuria ja leikkausvoiman kestävyys vielä vähemmän. Kokeilussa kaikki pituussuuntaiset lamellit olivat keskenään saman paksuisia ja poikittaissuuntaiset samoin. Samalla todettiin, että  $\gamma_i$  -kerroin ei ainakaan Stora Enson varastokokoisilla viisi- ja seitsemänlamellisilla levyillä ole missään tapauksessa  $\gamma_i < 0,9$ . Kokeilun perusteella selvisi myös, että mitä paksumpia lamellit ovat, sitä pienempi myös kerroin on. Sen perusteella voidaan todeta, että jos jompikumpi lamellikerroksista on yli 30 mm, on  $\gamma_i \approx 0,95$ . Ja mikäli toinen kerroksista on vähintään 30 mm paksu ja toinen 40 mm, on kerroin  $\gamma_i \approx 0,9$ . Tavanomaisissa ja helppoissa rakenteissa voi suunnittelija siis oman harkinnan mukaan valita tapauskohtaisesti käyttämänsä liitoshyötysuhdekerroimen arvon  $\gamma_i = 0,9 \dots 1,0$  väliltä, jos ei näe syytä sen tarkemmalle määrittämiselle.

### 7.7.3 Palkkien mitoitus

FPInnovation esittää CLT-handbook:ssa myös palkkimaisten CLT-rakenteiden, kuten seinien ja muiden aukkojen ylityspalkkien yksinkertaistetun taivutuslujuuden laskennan. Taivutusjännitys voidaan määrittää kaavan 18 mukaan.

$$\sigma = M * y * \frac{E_{mean}}{(EI)_{eff}} \quad (18)$$

Suurin jännitys esiintyy palkin ylä- ja alareunoissa, eli kun  $y = \frac{H}{2}$ . Tällöin kaava 18 voidaan saattaa kaavan 19 muotoon.

$$\sigma_{max} = M * 0,5H * \frac{E_{mean}}{(EI)_{eff}} \quad (19)$$

Mitoitusehtona on:

$$\sigma_{max} \leq f_{m,d}$$

Mitoitusehdosta ja kaavasta 19 voidaan johtaa kaava 20, jonka tuloksena saadaan palkin kestävä momentti.

$$M_r = f_{m,d} * \frac{(EI)_{eff}}{E_{mean}} * \frac{1}{0,5H} \quad (20)$$

Kaavassa 20  $E_{mean}$  on syysuuntainen keskimääräinen kimmokerroin kantosuuntaan kulkevissa lamelleissa ja  $(EI)_{eff}$  määritetään käyttämällä nettopoikkileikkauksen arvoja. Mikäli kimmokerroin on kaikissa kerroksissa sama, voi kaavan 20 ilmaista kaavan 21 muodossa.

$$M_r = f_{m,d} * \frac{I_{eff}}{0,5H} \quad (21)$$

$$\text{jossa } I_{eff} = \frac{h_{eff} * H^3}{12} = \frac{H^3}{12} * \sum_i h_i \quad (22)$$

Kaavassa 22 oleva  $h_i$  on kuormitusta kohtisuoraan olevien lamellien paksuus ja  $H$  on palkin korkeus. Liitteessä 7 on esitetty CLT-palkin taivutuslujuuden laskentaesimerkki. [24.]

#### 7.7.4 Seinäelementin mitoitus

Seinäelementtien mitoitukseen voidaan käyttää Eurokoodin EN 1995-1 liitteen C mukaista mekaanisten liittimien avulla koottujen pilarien laskentamallia. Lähteen 23 ohjeen mukaan varsinkin kolmilamellisten CLT-seinälevyjen lamellit tulisi olla siten, että uloimpien kerrosten syyt kulkevat pysyvien kuormien suuntaisesti, eli pystysuoraan. [24.]

Eurokoodin EN 1995-1 liitteen C mukaisesti laskettuna seinän tehollinen hoikkuus voidaan määrittää kaavan 23 mukaan.

$$\lambda_{eff} = l \sqrt{\frac{A_{tot}}{I_{ef}}} \quad (23)$$

$$\text{missä } I_{ef} = \frac{(EI)_{eff}}{E_{mean}} \quad (24)$$

Kaavan 24  $(EI)_{eff}$  arvo lasketaan kuten lattialaatoissa ja  $E_{mean}$  on pystykuormien suuntaisten lamellien syiden suuntainen kimmokerroin.

Kun tehollinen hoikkuus on laskettu, sijoitetaan se Eurokoodin EN 1995-1 kaavaan 6.21 ja tästä eteenpäin laskenta kulkee normaalisti Eurokoodin EN 1995-1 luvun 6.3.2 ”Puristetun sauvan kestävyys (nurjahduskestävyys) sekä puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus” mukaan. Seinäelementin mitoitusesimerkki on esitetty liitteessä 8. Esimerkissä on laskettu rakenteen pystykuorman kestävyys nurjahdus huomioiden, mutta ilman vaakakuormia. [24.]

Kuten luvussa 7.4 mainittiin, tulee seinärakenteiden paikallinen puristus eli leimainekestävyys ottaa laskelmissa myös huomioon. Varsinkin seinään tukeutuvien palkkien tukireaktiot saattavat olla hyvin suuria. Koska CLT:n pitkittäisten ja poikittaisten lamellien kimmokertoimien arvot poikkeavat toisistaan huomattavan paljon ja pinta-aloiltaan lamellien poikkileikkaukset ovat yleensä kutakuinkin samoja, on pitkittäisten lamellien kokoonpuristuvuus huomattavasti pienempi. Tällöin kuormat pyrkivät jakautumaan ensisijaisesti pitkittäisille, eli kuorman suuntaisille lamelleille. Mitoitus tulisi siis tehdä ensisijaisesti niiden puristuslujuuden perusteella. Todellisuudessa osa kuormasta jakautuu kuitenkin poikittaistille lamelleille myös liimasauman välityksellä, joten niidenkin osuus kuorman jakautumiseen voidaan ottaa huomioon suunnittelijan harkinnan mukaan. Lisäksi jos seinään tukeutuva palkki ei jatku seinän yli, on puristusjännitys

seinän palkin puoleisessa reunassa suurempi palkin kiertymän takia. Stora Enson teknisessä ohjeessa todetaan, että tarvittaessa palkilta tulevia kuormia voidaan jakaa suuremmalle alueelle seinän yläpäähän asennettavalla teräslevyllä, jolloin puristusjännitykset seinässä pienenevät. Vaihtoehtoina esitetään pilarin lisäämistä seinän viereen sekä puupalkin päähän ja seinälevyyn asennettavia teräsosia, kuten kuvassa 31.



Kuva 31. Puupalkit voidaan kiinnittää CLT-seinälevyihin myös Stora Enson esittämin teräsosin. [4.]

## 8 Yhteenveto

Ullakkohuoneistojen rakentaminen vanhan käyttöullakon tilalle on tavallisesti tehty suurimmaksi osaksi paikalla rakentaen. Käsityönä tehtynä työ on monivaiheista ja hitaasti etenevää. Tällöin rakennuksen vesikatto joutuu olemaan pitkiä aikoja auki, jolloin kosteusvaurioiden riski on suuri. Tehokas keino rakennusajan lyhentämiseen löytyy elementtirakentamisesta. Suomessa uudisrakennuksia on rakennettu betonielementeistä jo vuosikymmenien ajan ja viimevuosien aikana myös puuelementtien osuus on kasvanut. Puuelementtejä tehdään sekä puurankarungolla että CLT-rungolla. CLT-levyjen suuren jäykkyyden ansiosta runkoa ei tarvitse jäykistää esimerkiksi kipsilevyin, kuten rankarunkoisissa rakennuksissa. CLT-levyillä voidaan toteuttaa ristiin kantavia laattarakenteita, joten erillisiä lattiapalkkeja ei välttämättä tarvita. Lisäksi CLT-levy toimii vaipparakenteissa höyryn- ja ilmansulkuna, joten erillistä höyrynsulkumuovia ei tarvita. CLT-levy on lujuutensa ansiosta ihanteellinen materiaali tilaelementtien rakentamiseen. Lisäksi tilaelementtirakentamisen etuina ovat rakentamisen nopeus ja kuivat tehdasolosuhteet.

Koska puurakenteisista tilaelementeistä tehdään nykyään kokonaisia asuinkerrostaloja, voidaan niitä käyttää hyvin myös ullakoiden muuttamiseen asuinkäyttöön. Tässä opinäytetyössä selvitettiin aluksi kirjallisuutta tutkimalla mitä rakennesuunnitteluun liittyviä asioita täytyy yleensä huomioida erityisesti CLT-rakentamisessa sekä mitkä asiat vaikuttavat CLT-tilaelementtien käyttöön erityisesti ullakoiden lisärakentamisessa. Yleisesti CLT-rakentamisessa on kiinnitettävä huomiota muun muassa palosuojaukseen, rakenteiden tiiveyteen ja kosteustekniseen toimintaan sekä äänien kulkeutumiseen rakennuksessa. Ullakkorakentamisessa huomioitavat asiat taas tulevat lähinnä asema-kaavojen asettamista määräyksistä, jotka koskevat ullakoiden muuttamista asuinkäyttöön yleensä, eikä pelkästään tilaelementeillä tai CLT-rakenteilla rakennettaessa. Ullakkorakentaminen on esimerkiksi Helsingissä hyvin säädeltyä ja se aiheuttaa monia rajoituksia. Vanhojen rakennusten pohjaratkaisut saattavat olla hyvin monimuotoisia, jolloin tilaelementeillä ei välttämättä ole järkevää rakentaa rakennuksen joka osaa. Joissakin rakennuksissa taas harjakorkeus ullakon lattiasta mitattuna on niin korkealla, että tilaelementin kokonaiskorkeudesta tulisi liian suuri esimerkiksi kuljetuksen tai tehtaan kriteerien kannalta. Monilla arvoalueilla Helsingissä on kattoikkunoiden ja parvekkeiden teko kadun puoleiselle julkisivulle kielletty, mutta sisäpihan puolelle sallittu. Tämä rajaa esimerkiksi huoneiston väliseinien sijoittelua siten, että joka huoneeseen tulisi saada myös luonnonvaloa. Tällöin harjan keskellä ei voi kulkea väliseinää, joka estäisi

valon kulkeutumista talon sisäpihan puolelta. Joillakin alueilla taas kattoikkunoiden teko on kielletty kokonaan, jolloin ullakkohuoneiston teko saattaa olla kokonaan mahdotonta.

Yhtenä osana tätä opinnäytetyötä oli tutkia millä tavoin CLT-tilaelementit voitaisiin tukea pelkästään vanhoihin kantaviin pystyrakenteisiin. 1920 – 1950 -luvuilla on käytetty useita eri yläpohjatyyppejä, mutta yleisin tai ainakin yksi yleisimpiä on tähän opinnäytetyöhön rajattu alalaattapalkisto. Alalaattapalkiston kanssa tilaelementtien tuenta on yksinkertaisimmin hoidettavissa uusilla kantavilla teräspalkeilla, jotka asennetaan alalaattapalkiston kantavien palkkien väleihin. Tällöin uudet kantavat rakenteet jäävät vanhan yläpohjan sisään ja ullakolle jää enemmän huonekorkeutta. Teräspalkit tukeutuvat päistään ulkoseinille ja rakennuksen keskellä kantavaan väliseinään tai pilareihin. Jotta CLT-tilaelementeistä voitaisiin rakentaa ullakkohuoneisto, ei vanhalla yläpohjarakenteella kuitenkaan ole välttämättä merkitystä. Tuentatapa vain täytyy suunnitella aina kohteen yläpohjarakenteen kanssa yhteen sopivaksi ja jos vesikattokorko ei saa nousta entisestä, täytyy tarkistaa ullakolle jäävän huonekorkeuden riittävyys. Opinnäytetyössä tutkittiin myös sitä, voisiko teräspalkit kiinnittää tilaelementteihin jo tehtaalla, jolloin rakennusaika lyhenisi vielä hieman enemmän. Palkkien kiinnityksen CLT-elementteihin tulisi kuitenkin olla sellainen, että palkin paikkaa voidaan työmaalla vielä hieman siirtää. Lisäksi palkkien kiinnitys tehtaalla edellyttää sitä, että tilaelementin kokonaiskorkeus ja -pituus pysyy vielä sallituissa rajoissa. Loppujen lopuksi teräspalkkien osuus koko opinnäytetyössä jäi ainoaksi asiaksi, joka liittyy varsinaisesti ullakkorakentamiseen. Tämä johtuu siitä, että CLT-tilaelementtien käytölle ullakoiden lisärakentamisessa ei yksinkertaisesti löytynyt mitään muuta tekijää, joka poikkeaisi muusta tilaelementtirakentamisesta tai CLT-rakentamisesta.

Opinnäytetyön osana tarkasteltiin myös CLT-rakenteiden kosteus- ja lämpötekniistä käyttäytymistä sekä palomääräysten asettamia suojaverhousvaatimuksia. Koska CLT-levy toimii vaipparakenteessa höyrynsulkuna, täytyy lämmöneriste sijoittaa aina levyn kylmälle puolelle. Muutoin CLT-levyn ja lämmöneristeen rajapintaan tiivistyy kosteutta. Ulkoseinän ulkopuolinen suojaverhous tulisi tehdä pelkällä kivivillalla, sillä tiiviit suojaverhouslevyt kuten kuitukipsilevy heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Ääniteknisiä ratkaisuja ei tässä opinnäytetyössä juurikaan tutkittu työn laajuuden takia, mutta niiden periaatteet selvitettiin. Esimerkiksi kuinka runkoäänien kulkeutuminen ullakolta sen alapuolisiin tiloihin estetään ja miten tavallisen huoneiston seinän ilmaääneneristävyyttä voidaan arvioida suuntaa-antavasti.

CLT-rakenteiden mitoittamisesta voitaisiin tehdä hyvinkin laajoja tutkimuksia, mutta tähän opinnäytetyöhön rajattiin vain yleisimpien rakenteiden mitoittamisen perusteet. Esimerkiksi taipuman ja värähtelyn laskenta jätettiin kokonaan pois opinnäytetyön laajuuden takia. Rakenteiden mitoittamiseen on olemassa useita eri menetelmiä pohjautuen kokeisiin ja täysin analyttisiin menetelmiin, mutta tässä on tarkasteltu Eurokoodiin 5 pohjautuvia tapoja. Kaavat perustuvat pitkälti rakenteen tehollisen jäykkyyden määrittämiseen. Tehollisen jäykkyyden määrittämisessä huomioidaan lamellikerrosten määrät, suunnat ja paksuudet, lamellien kimmokertoimet sekä pitkittäisten ja poikittaisten lamellien välinen liitoshyötysuhdekerroin  $\gamma_i$ , joka huomioi myös poikittaisten kerrosten leikkausmuodonmuutoksen. Eri levypaksuuksien jäykkyyksiä laskemalla kuitenkin todettiin, että liitoshyötysuhdekerroimen saamat arvot voitaisiin suunnittelijan harkinnan mukaan jättää määrittämättä tavanomaisissa ja helppoissa kohteissa. Tällöin  $\gamma_i$ -kertoimelle voitaisiin käyttää arvoa 0,9:n 1,0:n väliltä lamellien paksuuksien mukaan.

Opinnäytetyöhön ja yhtenä sen tuloksena tehtiin rakennedetalji ja -tyyppikirjastoihin sekä kirjalliseen suunnitteluohjeeseen kerättiin hyödyllistä tietoa CLT-tilaelementtien suunnittelusta sekä niiden soveltamisesta ullakkotilojen lisärakentamiseen. Rakennedetaljit ja ohje tehtiin olemassa olevan rakennuksen rakenteiden perusteella, mutta ratkaisut pyrittiin tekemään siten, että ne soveltuisivat myös mahdollisimman yleisellä tasolla. Jos ja kun lähdetään suunnittelemaan tämän opinnäytetyön mukaista ullakon lisärakentamista tämän työn tulosten perusteella, tulee suunnitelmia tarkentaa kohteen mukaan ja todennäköisesti jotkin rakennedetaljit eivät toteudu millään tavalla kaikissa kohteissa. Työn tulokset auttavat siis lähinnä rakenteiden esimitoituksessa hanke- ja luonnossuunnitteluvaiheissa.

## Lähteet

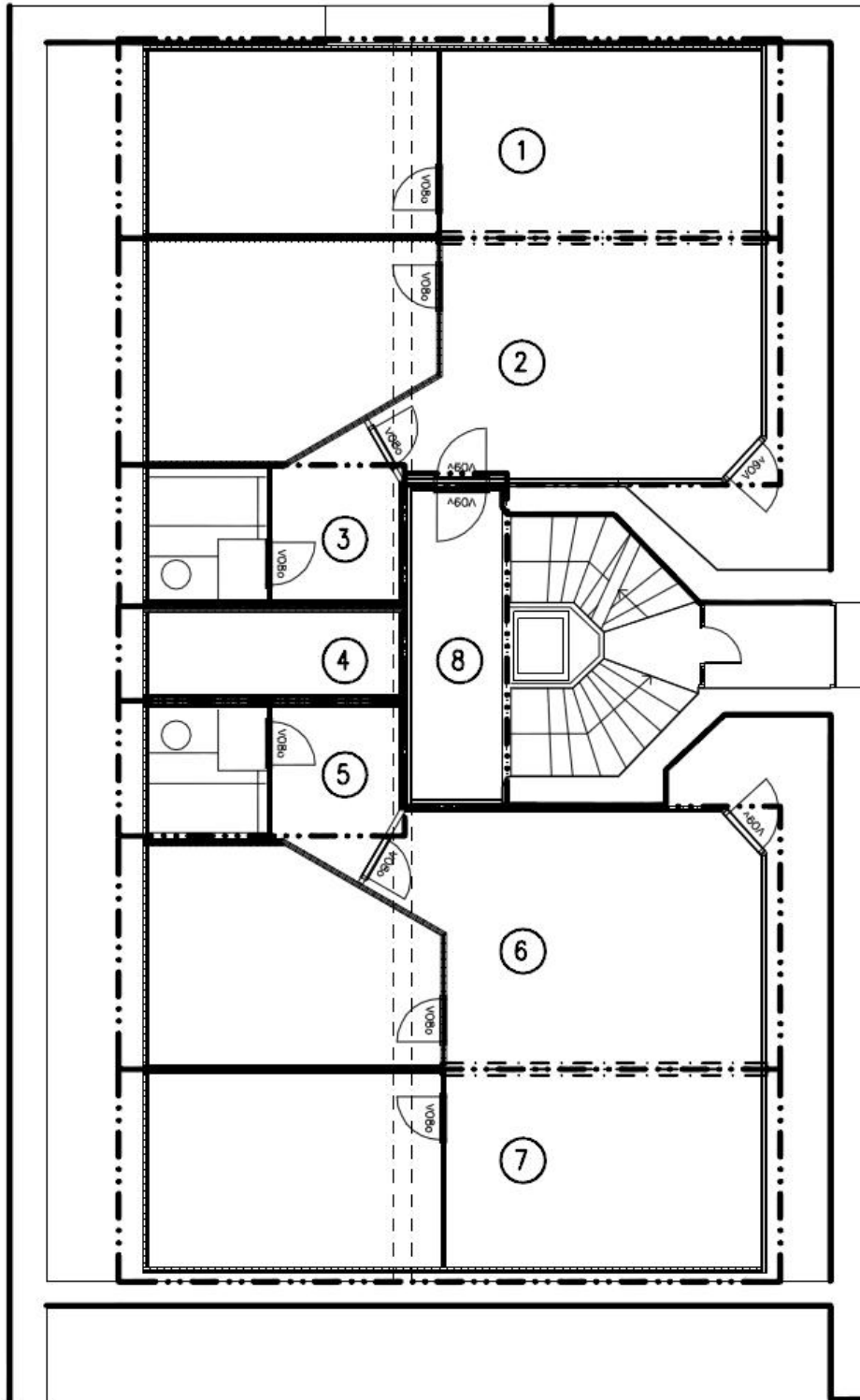
- 1 Neuvonen, Petri. 2006. Kerrostalot 1880–2000 - arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen.. Rakennustieto Oy. Tammer-Paino Oy.
- 2 Neuvonen, Mäkiö, Malinen. 2002. Kerrostalot 1880–1940. Rakennustieto Oy. Karisto Oy.
- 3 Stora Enson CLT:n tekniset tiedot. Verkkodokumentti. <<http://www.clt.info/fi/produkt/technische-daten-3/>>. Luettu 12.12.2014
- 4 Stora Enso tekninen kansio. Verkkodokumentti. <<http://www.clt.info/fi/media-ladattavat/broschuren/broschuren-2/>>. Luettu 12.12.2014
- 5 Ullakolle-esite. Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto. Verkkodokumentti. <[http://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/esitteet/esite\\_2010-1.pdf](http://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/esitteet/esite_2010-1.pdf)>. Luettu 12.12.2014
- 6 Ullakkojen rakentamistapaohje. Helsingin kaupungin rakennusvalvontavirasto. Verkkodokumentti. <<http://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Ullakkorakentaminen.pdf>>. Luettu 12.12.2014
- 7 Ullakkorakentaminen, Helsingin kaupungin rakennusvalvontavirasto. Verkkodokumentti. <<http://www.hel.fi/hki/rakvv/fi/Rakentaminen+ja+luvat/Ullakkorakentaminen>>. Luettu 12.12.2014
- 8 Ullakkorakentamisen haasteet ja mahdollisuudet. Verkkodokumentti. <<http://www.korjaustieto.fi/taloyhtiot/korjaushankkeet/taydennys-jalissarakentaminen/ullakkorakentamisen-haasteet-ja-mahdollisuudet.html>>. Luettu 12.12.2014
- 9 Puun palotekniset ominaisuudet. Puuinfo. Verkkodokumentti <<http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/paloteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>>. Luettu 23.1.2015
- 10 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E1, Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet 2011.
- 11 TuplaA-koulutus 2014, puurakenteiden suunnittelijoiden AA-täydennyskoulutusaineisto. Puuinfo.
- 12 Puurakentaminen Suomessa lisääntyy, tekijöitä surkean vähän. Tekniikka & talous. Verkkodokumentti.

- <<http://www.tekniikkatalous.fi/rakennus/puurakentaminen+suomessa+lisaantyy+tekijoita+surkean+vahan/a1016511?service=mobile>>. Luettu 12.12.2014
- 13 Palokatko-opas 2012, palokatko yhdistys. Verkkodokumentti.  
<[http://www.palokatko yhdistys.fi/files/palokatko-opas\\_2012.pdf](http://www.palokatko yhdistys.fi/files/palokatko-opas_2012.pdf)>. Luettu 6.2.2015
  - 14 Toimivat katot 2013, Kattoliitto ry. Vammalan kirjapaino Oy. Verkkodokumentti.  
<[http://www.kattoliitto.fi/files/504/Toimivat\\_Katot\\_2013\\_reduced\\_size\\_.pdf](http://www.kattoliitto.fi/files/504/Toimivat_Katot_2013_reduced_size_.pdf)>. Luettu 18.2.2015
  - 15 Sewatek Oy, CLT palokatkotuotteiden valmistajan kotisivut. Verkkodokumentti.  
<[http://sewatek.fi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=172&Itemid=444](http://sewatek.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=172&Itemid=444)>. Luettu 6.2.2015
  - 16 Runkojärjestelmän vaikutus puukerrostalon suunnitteluun, Puuinfo. Verkkodokumentti.  
<<http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkoj%C3%A4rjestelm%C3%A4n-vaikutukset-puukerrostalon-arkkitehtisuunnitteluun>>. Luettu 12.12.2014
  - 17 Massiivinen jälleenrakentaminen edessä Suomen lähiöissä. Verkkodokumentti.  
<[http://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/10940/massiivinen\\_jalleenrakentaminen\\_edessa.htm#.VOrHZk0cSic](http://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/10940/massiivinen_jalleenrakentaminen_edessa.htm#.VOrHZk0cSic)>. Luettu 12.12.2014
  - 18 Helsingin ullakkorakentamisen kaupunkikuvalliset vyöhykkeet. Kaupunkisuunnitteluvirasto, Rakennusvalvontavirasto, Kaupunginmuseo. Verkkodokumentti.  
<[http://www.hel.fi/static/public/hela/Kaupunginhallitus/Suomi/Paatos/2013/Halke\\_2013-12-09\\_Khs\\_44\\_Pk/C3AA086C-B182-4BAE-ABB8-870AB6A2DA17/Liite.pdf](http://www.hel.fi/static/public/hela/Kaupunginhallitus/Suomi/Paatos/2013/Halke_2013-12-09_Khs_44_Pk/C3AA086C-B182-4BAE-ABB8-870AB6A2DA17/Liite.pdf)>. Luettu 12.12.2014
  - 19 Ristiinliimatun massiivipuulevyn tekniset tiedot, Puuinfo. Verkkodokumentti.  
<<http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/clt-ristiinliimattu-massiivipuu-cross-laminated-timber>>. Luettu 6.2.2015
  - 20 Ullakkorakentamisohje, Helsingin rakennusvalvontavirasto 16.9.2014. Verkkodokumentti. <<http://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Ullakkorakentaminen.pdf>>. Luettu 2.3.2015
  - 21 RunkoPES 2.0, osa 11: rakennetyypikirjasto 31.12.2013. Verkkodokumentti.  
<[http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20/runkopes\\_2.0\\_osa\\_11\\_rakennetyypikirjasto\\_0.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20/runkopes_2.0_osa_11_rakennetyypikirjasto_0.pdf)>. Luettu 2.3.2015
  - 22 RunkoPES 2.0, osa 12: liittymädetaljikirjasto 31.12.2013. Verkkodokumentti.  
<[http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20/runkopes\\_2.0\\_osa\\_12\\_liittymadetaljikirjasto.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20/runkopes_2.0_osa_12_liittymadetaljikirjasto.pdf)>. Luettu 2.3.2015

- 23 Kari Suvanto. Metropolia AMK. kevät 2014. Rakennusfysiikan simuloinnit, opimateriaali.
- 24 FPInnovations CLT -handbook Chapter 3: Structural design of cross-laminated timber elements. Quebec, QC: Special Publication SP-528E
- 25 RIL 205-1-2009 CLT päivitykset 7.5.2014 Verkkodokumentti.  
<<http://www.ril.fi/kirjakauppa/attachment/download/2656b4dddf8a0752ec8e3d392e1a9c6f>>. Luettu 10.3.2015
- 26 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C3, Rakennusten lämmöneristys, määräykset 2010.
- 27 Suomen korkeimman puukerrostalon elementtejä asennetaan, artikkeli 4.7.2014. Verkkodokumentti.  
<[http://www.lakea.fi/Suomen\\_korkeimman\\_puukerrostalon\\_elementteja\\_asennetaan](http://www.lakea.fi/Suomen_korkeimman_puukerrostalon_elementteja_asennetaan)>. Luettu 21.3.2015
- 28 Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C1, Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet 1998.
- 29 Lahtela Tero. Wood Focus Oy. 2004. Ääneneristys puutalossa, puurakenteisen asuinrakennuksen ääneneristävyiden suunnitteluohje.

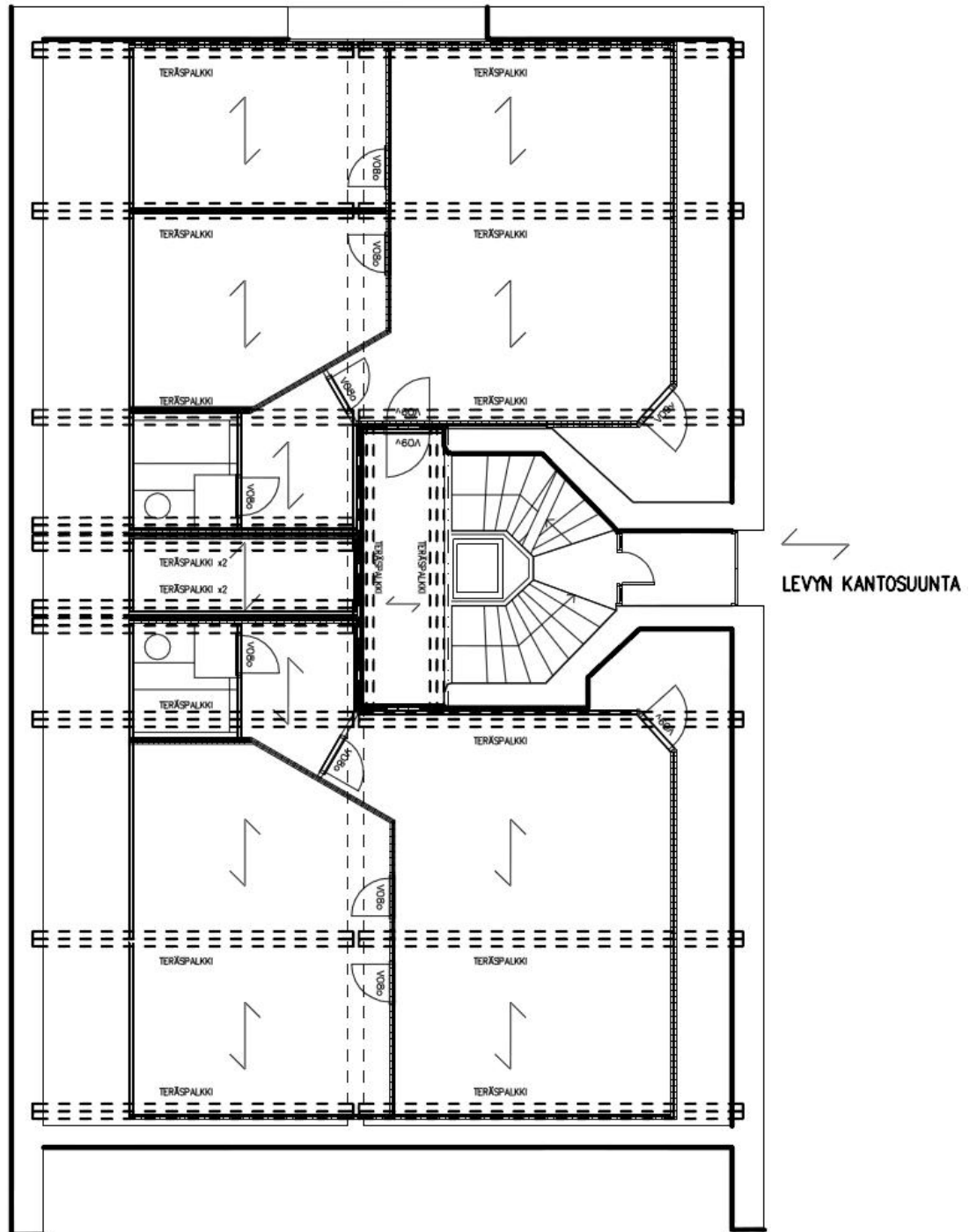
## Tilaelementtijako mallikohteessa

Yksi tilaelementtijakovaihtoehto mallikohteena käytetyn rakennuksen pohjan mukaan. Kantavia pystyrakenteita ovat ulkoseinät ja keskilinjan väliseinä.



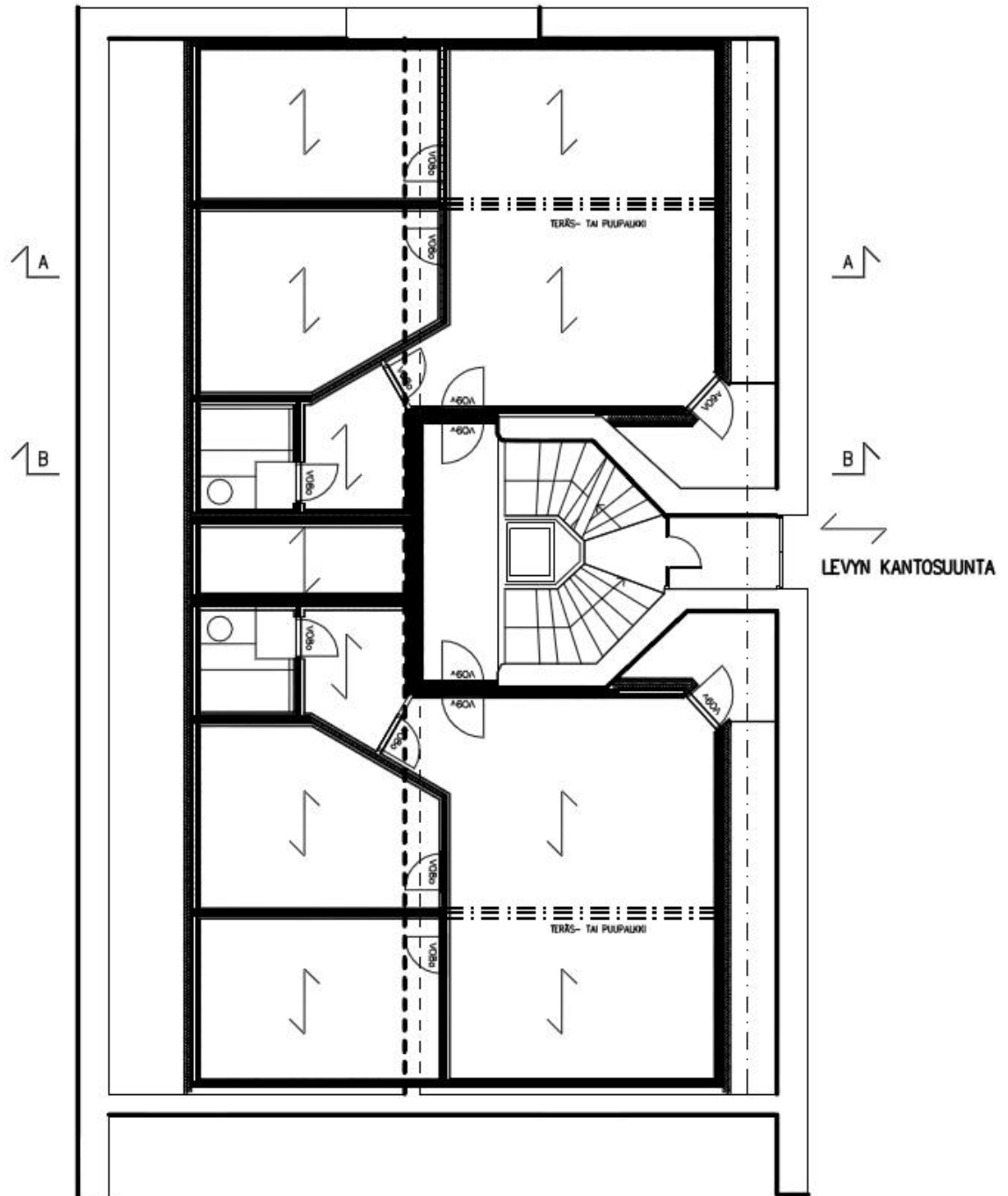
## Välipohjan kantavat rakenteet

Välipohjan uudet kantavat teräspalkit ja CLT-levyt



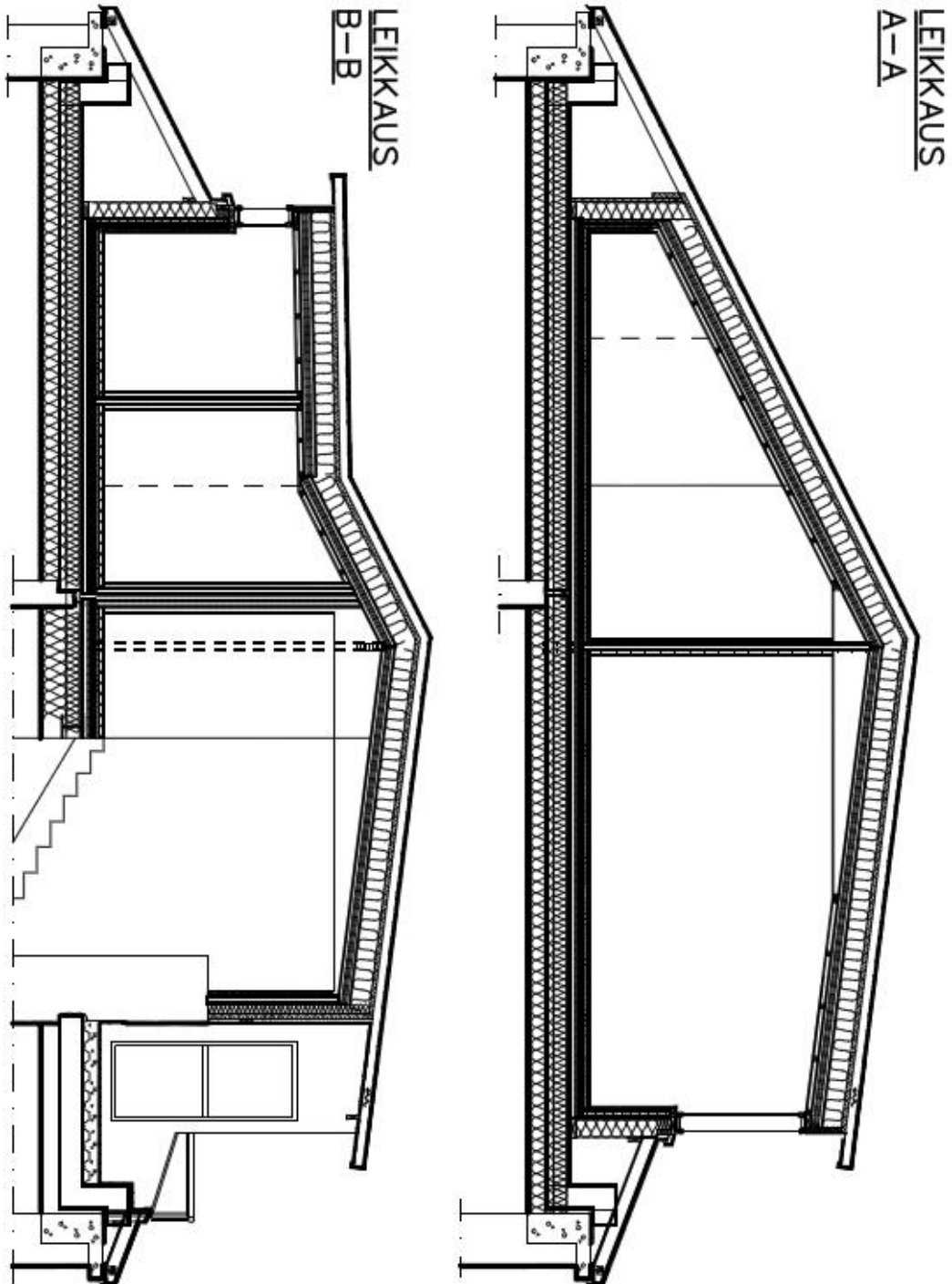
## Yläpohjan kantavat rakenteet

Yläpohjan kantavat palkit ja CLT-levyt.



## Rakenneleikkaukset

Rakenneleikkaukset A-A ja B-B ullakolla



## Rakenteen lämpö- ja kosteusjakauman laskenta

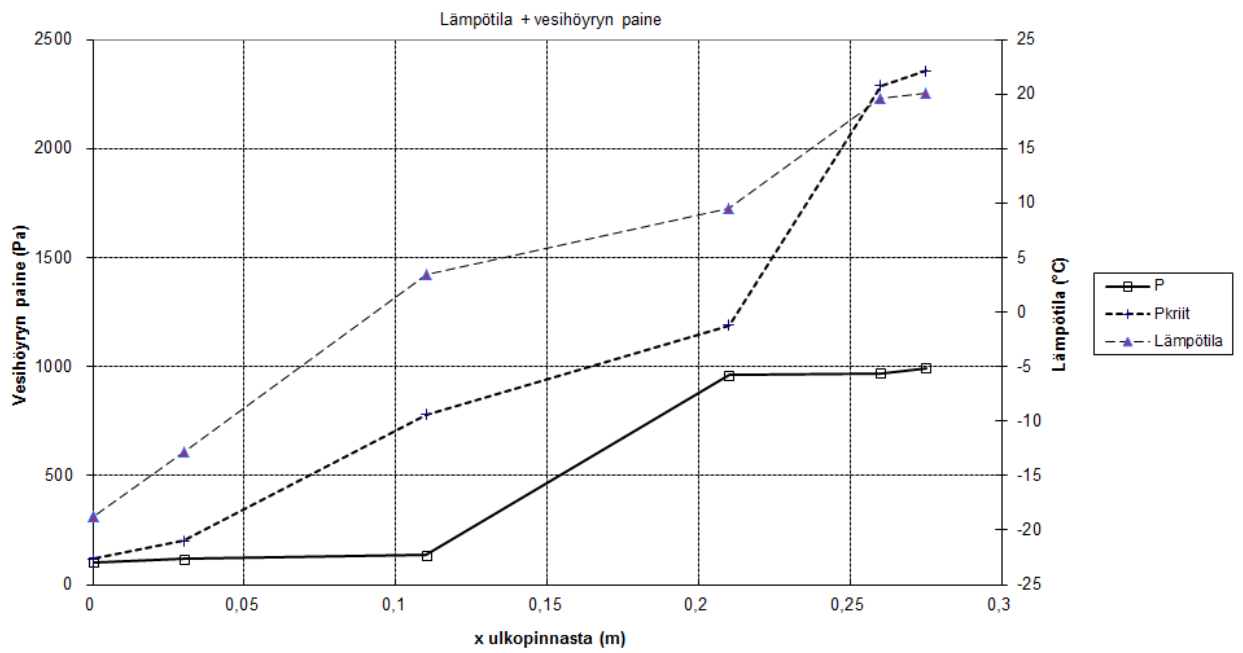
Liitteen sivuilla 1 ja 2 olevat taulukko ja kuvaaja ovat kuvan 8 rakenteesta ja sivujen 3 ja 4 taulukko ja kuvaaja ovat kuvan 9 rakenteesta. Sivulla 5 on kuvan 11, kuitukipsilevyllä palosuojatun rakenteen lämpö- ja kosteusjakauman laskenta. Sivulla 6 ja 7 on vastaavat laskelmat ja taulukot yläpohjarakenteesta. Oikeassa laidassa oleva sarake näyttää rakennekerroksissa vallitsevan suhteellisen kosteuden. Punaisella oleva ruutu sisemmässä eristekerroksessa näyttää, että suhteellinen kosteus nousee yli RH 80 %, joka mahdollistaa homeen kasvulle sopivan alustan

Aine	d (m)	$\lambda$ (W/mK)	Ri	Ri/R <sub>T</sub>	t	pk	Zi	Zi/Zkok	pi(Pa)	RH (-)
					21	2485,8			994,3	0,4
Rsi			0,13	0,022						
					20,1	2356,1			994,3	0,4
kipsilevy (palos.)	0,015	0,21	0,071	0,012			5,70E+08	0,026		
					19,7	2287,4			970,8	0,42
min.villa 50	0,05	0,033	1,515	0,254			2,50E+08	0,012		
					9,5	1188,5			960,5	0,81
CLT	0,1	0,11	0,909	0,152			2,00E+10	0,925		
					3,4	780,8			135,2	0,17
kivivilla 80	0,08	0,033	2,424	0,406			4,36E+08	0,020		
					-12,8	201,7			117,2	0,58
tuulens./lämmöne	0,03	0,034	0,882	0,148			3,60E+08	0,017		
					-18,7	116,7			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,7	116,7			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,7	116,7			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,7	116,7			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,7	116,7			102,4	0,88
Rse			0,04	0,007				0,000		
					-19	113,8			102,4	0,9
		R <sub>T</sub> :	5,972	1	40	Zkok:	2,2E+10	1	891,9	

U-arvo  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

dT

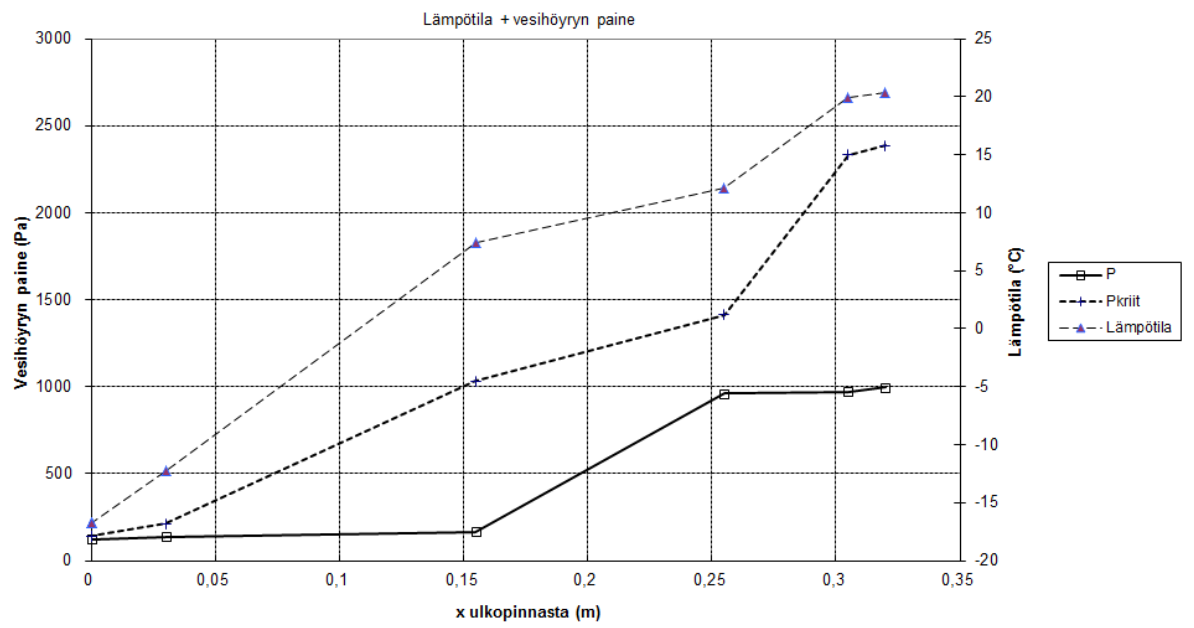
dp



## Toimivan ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusjakauman laskeminen

Aine	d (m)	$\lambda$ (W/mK)	R <sub>i</sub>	R <sub>i</sub> /R <sub>T</sub>	t	pk	Z <sub>i</sub>	Z <sub>i</sub> /Z <sub>kok</sub>	pi(Pa)	RH (-)
					21	2485,8			994,3	0,4
R <sub>si</sub>			0,13	0,018						
					20,3	2379,8			994,3	0,4
kipsilevy (palos.)	0,015	0,21	0,071	0,01			5,70E+08	0,026		
					19,9	2323,2			971,1	0,42
min.villa 50	0,05	0,033	1,515	0,207			2,50E+08	0,011		
					11,6	1370,4			960,9	0,7
CLT	0,1	0,11	0,909	0,124			2,00E+10	0,915		
					6,7	981,1			144,9	0,15
kivivilla 125	0,125	0,033	3,788	0,516			6,81E+08	0,031		
					-14,0	181,7			117,1	0,64
tuulens./lämmöne	0,03	0,034	0,882	0,12			3,60E+08	0,016		
					-18,8	116,1			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,8	116,1			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,8	116,1			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,8	116,1			102,4	0,88
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-18,8	116,1			102,4	0,88
R <sub>se</sub>			0,04	0,005				0,000		
					-19	113,8			102,4	0,9
			R <sub>T</sub> :	7,336	1	40	Z <sub>kok</sub> :	2,2E+10	1	891,9

U-arvo dT dp  
0,14 W/(m<sup>2</sup>K)



Kuitukipsilevyllä ulkopuolelta suojaverhottu ulkoseinärakenne. Ulkopuolisen eristekerroksen suhteellinen kosteus on talvella jo pienillä pakkasilla hyvin korkea.

Aine	d (m)	$\lambda$ (W/mK)	Ri	Ri/R <sub>T</sub>	t	pk	Zi	Zi/Zkok	pi(Pa)	RH (-)
					21	2485,8			994,3	0,4
Rsi			0,13	0,018						
					20,5	2410,3			994,3	0,4
kipsilevy (palos.)	0,015	0,21	0,071	0,01			5,70E+08	0,025		
					20,2	2369,7			976,7	0,41
min.villa 50	0,05	0,033	1,515	0,209			2,50E+08	0,011		
					14,4	1638,0			969,0	0,59
CLT	0,1	0,11	0,909	0,125			2,00E+10	0,894		
					10,9	1301,4			352,1	0,27
min.villa 150	0,15	0,033	4,545	0,627			7,50E+08	0,034		
					-6,7	347,3			329,0	0,95
Kuitukipsilevy	0,0125	0,316	0,04	0,005			8,00E+08	0,036		
					-6,8	342,7			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,8	342,7			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,8	342,7			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,8	342,7			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,8	342,7			304,3	0,89
Rse			0,04	0,006				0,000		
					-7	338,1			304,3	0,9
		R <sub>T</sub> :	7,251	1	28	Zkok:	2,2E+10	1	690,0	

U-arvo dT dp  
0,14 W/(m<sup>2</sup>K)

Lasketaan, kuinka paljon mineraalivillan ja tuulensuojalevyn rajapintaan tiivistyy kosteutta, kun lämpötila laskee -13 °C:een.

3,2351E-09 kg/m<sup>2</sup>s

Kuukaudessa neliölle tiivistynyt kosteus

0,0086648 kg

**Yläpohjarakenteen lämpö- ja kosteusjakauman laskeminen**

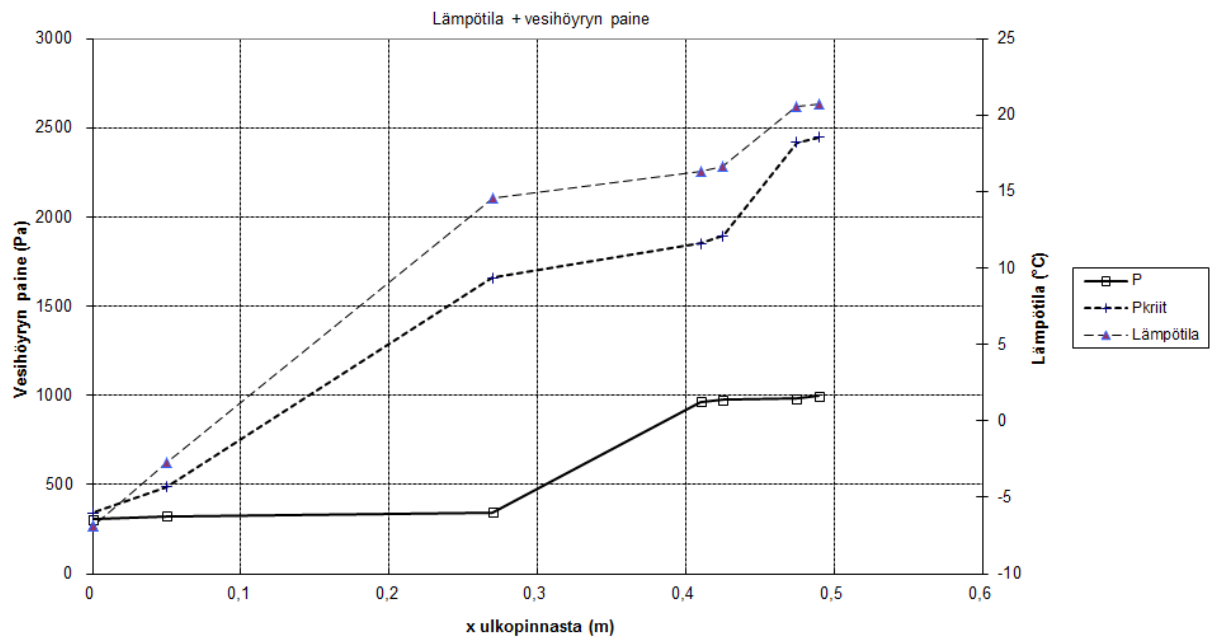
Aine	d (m)	$\lambda$ (W/mK)	R <sub>i</sub>	R <sub>i</sub> /R <sub>T</sub>	t	pk	Z <sub>i</sub>	Z <sub>i</sub> /Z <sub>kok</sub>	pi(Pa)	RH (-)
					21	2485,8			994,3	0,4
R <sub>si</sub>			0,1	0,009						
					20,7	2446,6			994,3	0,4
kipsilevy (palos.)	0,015	0,21	0,071	0,007			5,77E+08	0,018		
					20,6	2418,9			981,6	0,41
min.villa 50	0,05	0,033	1,515	0,14			2,50E+08	0,008		
					16,6	1892,9			976,1	0,52
kipsilevy (palos.)	0,015	0,11	0,136	0,013			5,77E+08	0,018		
					16,3	1850,9			963,3	0,52
CLT	0,14	0,21	0,667	0,062			2,80E+10	0,896		
					14,6	1657,1			345,1	0,21
min.villa 220	0,22	0,033	6,667	0,617			1,10E+09	0,035		
					-2,7	487,7			320,9	0,66
tuulens./lämmöne	0,05	0,031	1,613	0,149			7,50E+08	0,024		
					-6,9	341,2			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,9	341,2			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,9	341,2			304,3	0,89
--	0	1	0	0			0,00E+00	0,000		
					-6,9	341,2			304,3	0,89
R <sub>se</sub>			0,04	0,004				0,000		
					-7	338,1			304,3	0,9
		R <sub>T</sub> :	10,81	1	28	Z <sub>kok</sub> :	3,1E+10	1	690,0	

U-arvo

0,09

dT

dp



## Rakennusfysiikka

### Kaavakokoelma

- kriittiset vesihöyrynpitoisuudet ja osapaineet
- lämmönjohtavuuksia
- kosteuden läpäisykertoimia ja –vastuksia
- Suomen ilmasto-olosuhteet
- kaavoja

Taulukko 3. Rakennusaineiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja ( $\lambda_D$ ) sekä tiheyksiä ( $\rho$ ) ja ominaislämpökapasiteetteja vakiopaineessa ( $c_p$ ) Taulukossa esitetyt rakennusaineiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot pätevät Suomessa tavanomaisissa käyttöolosuhteissa, jotka vastaavat keskimäärin ilman lämpötilaa 10 °C ja 50 % ( $\pm 10$  %) suhteellista kosteutta.

Aine, tarvike	Tiheys ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Ominaislämpö- kapasiteetti ( $c_p$ ) J/(kg K)	Lämmön- johtavuuden suunnitteluarvo ( $\lambda_D$ ) W/(m K)
<b>LÄMMÖNERISTEET JA TÄYTEAINHEET</b>			
mineraalivilla, levy ja matto	10–200	1030	0,050
solumuovilevy, paisutettua polystyreeniä			
grafiittipohjainen eriste	10–50	1450	0,035
tavallinen eriste	10–50	1450	0,050
solumuovipuru, polystyreeniä	10–20	1450	0,080
solumuovilevy, suulakepuristusmenetelmällä valmistettua polystyreeniä			
ponneaineena CFC 12 <sup>1)</sup>	20–65	1450	0,035
muu ponneaine	20–65	1450	0,040
solumuovilevy, polyuretaania (PUR tai PIR)			
ponneaineena CFC 11 <sup>1)</sup>	28–55	1400	0,030 <sup>2)</sup>
	28–55	1400	0,024 <sup>3)</sup>
ponneaineena pentaani	28–55	1400	0,033 <sup>2)</sup>
	28–55	1400	0,030 <sup>3)</sup>
ruiskutettavat tai valettavat polyuretanieristeet			
umpisoluinen eriste	28–55	1400	0,033
avosoluinen eriste	28–55	1400	0,045
solulasilevy	100–150	1000	0,065 <sup>4)</sup>
puukuitueriste, levy	30–50	1600	0,050
pellava, levy ja matto	30–50	1600	0,050
lastuvillalevy	250–450	1470	0,080
korkilevy	150	1500	0,045
paisutettu	200	1500	0,050
	400	1500	0,065
koneellisesti puhallettavat kuitueristeet yläpohjassa <sup>5)</sup>			
mineraalivilla	15–60	1030	0,050
puukuitueriste	20–70	1600	0,050
seinässä			
puukuitueriste <sup>6)</sup>	35–70	1600	0,050
kutterinlastu			
löysänä	80	1600	0,140
sulottuna	120	1600	0,080
sahanpuru			
löysänä	120	1600	0,120
sulottuna	200	1600	0,080
sekoite kutterinlastun kanssa, 1:1	140	1600	0,070
<p>1) CFC-tuotteiden valmistus on kielletty, mutta niitä tuotteita on olemassa olevissa rakenteissa.</p> <p>2) Tehdasvalmisteiset levyt ilman diffuusiotiivistä pintaa tai lämmöneriste on paisutettu eristetilassa ja täyttää sen kokonaan.</p> <p>3) Tehdasvalmisteiset levyt, joissa on vähintään 50 µm paksut yhtenäiset metallipinnat tai lämmöneriste on paisutettu vähintään 50 µm paksujen yhtenäisten metallikerrosten väliin ja on molemmilla puolilla kautsaaltaan näihin kiinni liimaantunut.</p> <p>4) Lämmöneristelevyt on saumattu esimerkiksi bitumilla.</p> <p>5) Uusissa rakennuksissa puhallettavaan eristyspaksuuteen sisältyy valmistajan ilmoittama painuusvara.</p> <p>6) Lämmöneriste on märkäpuhallettu.</p>			

Aine, tarvike	Tiheys ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Ominaislämpö- kapasiteetti ( $c_p$ ) J/(kg K)	Lämmön- johtavuuden suunnitteluarvo ( $\lambda_U$ ) W/(m K)	
kalsiumsilikaattilevy	150	1000	0,050	
	300	1000	0,070	
	600	1000	0,10	
	1000	1000	0,16	
kevytbetonimurske	400	1000	0,15	
kevytsora	200–400	1000	0,10	
koksikuona	700	1000	0,25	
masuunikuona, rakeistettu	150	900	0,10 <sup>U</sup>	
	250	900	0,12 <sup>U</sup>	
<b>KIVIMATERIAALIT</b>				
asfaltti	2100	1000	0,70	
betoni	2000	1000	1,35	
	2200	1000	1,65	
	2400	1000	2,0	
	1 % terästä	2300	1000	2,3
	2 % terästä	2400	1000	2,5
betonireikäkivet muurattuina <sup>8)</sup>	1400	1000	0,55	
betonitöuskivet muurattuina	2000	1000	1,2	
karkaistu kevytbetoni elementteinä	400	1000	0,10	
	450	1000	0,12	
	500	1000	0,135	
	600	1000	0,175	
	harkkoina ohut- ja liimasaumoin	400	1000	0,12
450		1000	0,13	
500		1000	0,145	
600		1000	0,185	
kevytsorabetoni paikalleen valettuna tai elementteinä		650	1000	0,20
	800	1000	0,24	
	1000	1000	0,35	
	1200	1000	0,45	
	1400	1000	0,55	
	1600	1000	0,70	
valetut kevytsorabetonieristeet ylä- ja alapohjassa	400	1000	0,11	
	500	1000	0,13	
	600	1000	0,17	
kevytsorabetoniharkot muurattuina	rakosaumat	650	1000	0,20
	10 mm täydet saumat	650	1000	0,24
<sup>U)</sup> Käytettäessä täyteainetta yläpohjan lämmöneristeinä ilman yläpuolista tiivistävää kerrosta on annettuun $\lambda_U$ -arvoon lisättävä 0,02 W/(m K).				
<sup>8)</sup> Reikäkiven tiheytenä käytetään bruttotiheyttä eli massa jaettuna tilavudella ottamatta huomioon reikävaihennystä.				

Aine, tarvike	Tiheys ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Ominaislämpö- kapasiteetti ( $c_p$ ) J/(kg K)	Lämmön- johtavuuden suunnitteluarvo ( $\lambda_D$ ) W/(m K)
kalkkikiiekkatiilet muurattuina	1900	1000	0,95
poltetut tiilet muurattuina	1300	1000	0,50
reikätiilet <sup>(8)</sup>	1500	1000	0,60
täystiilet	1300	1000	0,60
	1500	1000	0,65
	1700	1000	0,70
rappauslaastit			
kalkkilaasti	1700	1000	0,90
kalkkisementtilaasti	1800	1000	1,0
sementtilaasti	2000	1000	1,2
<b>RAKENNUSLEVYT</b>			
kipsilevy	700	1000	0,21
	900	1000	0,25
kuitusementtilevy	1100	900	0,25
	1500	900	0,30
sementtilastulevy	1200	1500	0,23
lastulevy	300	1700	0,10
	600	1700	0,14
	900	1700	0,18
OSB-lastulevy	650	1700	0,13
puukuitulevy (myös MDF-levy)	250	1700	0,070
	400	1700	0,10
	600	1700	0,14
	800	1700	0,18
vaneri	300	1600	0,090
	500	1600	0,13
	700	1600	0,17
	1000	1600	0,24
<b>MUITA RAKENNUSAINEITA</b>			
bitumi	1050	1000	0,17
bitumikermi	1100	1000	0,23
huopa	120	1300	0,050
kipsi	600	1000	0,18
	900	1000	0,30
	1200	1000	0,43
	1500	1000	0,56
kumi			
butyyli	1200	1400	0,24
EPDM-kumi	1150	1000	0,25
luonnonkumi	910	1100	0,13
neopreeni	1240	2140	0,23
polyisobutyleeni	930	1100	0,20
polysulfidi	1700	1000	0,40
solukumi	270	1400	0,10
vahtokumi	60–80	1500	0,060

**Kosteus**

Eräiden rakennusaineiden kosteudenläpäisykertoimia ja -vastuksia. (RIL-107-2000)

Materiaali	Paksuus [mm]	Kosteudenläpäisykerroin $W_p$ [kg/(m <sup>2</sup> s*Pa)]*10 <sup>-9</sup>	Kosteudenläpäisy- vastus $Z_p$ [(m <sup>2</sup> s*Pa)/kg]*10 <sup>2</sup>
Paperi	1	10	0.1
Kalkkilaasti	10	2	0.5
Kipsilevy	13	2	0.5
Ilma	100	2	0.5
Mineraalivilla, kevyt	100	2	0.5
KS- laasti	10	1	1
Puolikova puukuitulevy	10	1	1
Lateksialustainen tekstiilimatto		1	1
Kevytsementti	100	1	1
Kevytbetoni	100	0.7	1.5
Kova puukuitulevy	3.5	0.7	1.5
Kuitusementtilevy	5	0.7	1.5
Mineraalivilla, kova	100	0.7	1.5
Bitumilla tai hartsilla kyllästetty huokoinen puukuitulevy	12	0.9	1.1
Lastulevy	12	0.4	2.5
Puu	10	0.2	5
Tili	100	0.2	5
Kalkkihiiekkakivi	100	0.1	10
Linoleum		0.04	25
Bitumipahvi, tuulensuoja		0.04	25
Solumuovi, EPS	100	0.04	25
Betoni	100	0.02	50
Vinyylimatto		0.01	100
Polyeteenikalvo	0.2	0.002	500
Bitumikermi (BTL 2)		0.0007	1500
Erikoiskalvot esim.			
Bitumikermi+alumiiniokkolevy (0.08mm)		0.0001	10000
Metalli, lasi		0.7	
Kalkkimaali		2	0.5
Öljyemulsiomaali		2	0.5
Sementtimaali		2	0.5
Silikaattimaali		1	1
Tekokumipohjainen julkisivumaali		0.06	15
Alkydiöljymaali		0.06	15
Kloorikautsumaali		0.02	50
Polyuretaanilakka		0.02	50

*Kova levy (Suomen Kivitehdas Oy)*

6

2,8

Taulukossa esitetyt arvot ovat ainoastaan suuntaa-antavia ja kunkin tuoteryhmän sisällä on taulukkoarvoista huomattavastikin poikkeavia arvoja.

50

500

SPU AL

Huomaa, että nämä pätee vain näille materiaalikerrosten paksuuksille. Paksuusmuunnos:

$$Z_p = (d_{\text{todellinen}} / d_{\text{taulukko}}) * Z_{p, \text{taulukko}}$$

## Suomen ilmasto-olosuhteita.

Ilman keskimääräiset lämpötilat  $T_m$  1961...1990.(RIL 107-2000 Taulukko 1.5)

Paikkakunta	Kuukausi												vuosi
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Helsinki-Vantaa	-6.9	-6.8	-2.9	2.9	9.9	14.9	16.6	15	10	5.4	0.1	-4.1	4.5
Turku	-6	-6.2	-2.6	3	9.8	14.6	13.5	15.2	10.3	5.7	0.6	-3.6	4.8
Tampere	-8	-7.9	-3.6	2.4	9.5	14.6	16.3	14.5	9.5	4.8	-0.5	-5.3	3.9
Lappeenranta	-9.4	-8.8	-3.8	2.3	9.8	14.8	16.7	14.8	9.5	4.2	-1.2	-6.2	3.6
Joensuu	-11.6	-10.7	-5.4	0.7	8.3	14.2	16.4	14	8.6	3.2	-2.7	-8.2	2.2
Jyväskylä	-10	-9.5	-4.7	1.3	8.7	14.1	15.7	13.6	8.3	3.4	-2.2	-7.2	2.6
Vaasa	-7.8	-7.9	-3.9	1.7	8.3	13.7	15.7	13.9	9.2	4.6	-0.9	-5.5	3.4
Oulu	-11.1	-10.4	-5.8	0.5	7.5	13.5	16	13.7	8.4	3	-3.1	-8.2	2
Sodankylä	-15.1	-13.6	-8.5	-2.1	5	11.6	14.1	11.2	5.9	-0.2	-7.4	-13.1	-1

Ilman keskimääräiset vesihöyrynpitoisuudet  $v_m$  [ $g/m^3$ ] 1961...1990. (RIL 107-2000 Taulukko 1.2)

Paikkakunta	Kuukausi											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Helsinki-Vantaa	2.45	2.41	3.16	4.37	6.08	8.42	10.2	10	7.9	6.01	4.34	3.11
Turku	2.66	2.55	3.24	4.46	6.13	8.16	9.98	9.87	7.96	6.12	4.49	3.28
Tampere	2.18	2.14	2.84	4.05	5.65	7.76	9.58	9.46	7.47	5.57	4.11	2.76
Lappeenranta	1.98	2.06	3.18	4.15	5.94	8.24	9.95	9.89	7.85	5.61	4.01	2.65
Joensuu	1.83	1.72	2.57	3.72	5.4	7.94	9.77	9.41	7.22	5.19	3.52	2.22
Jyväskylä	1.88	1.94	2.7	3.87	5.63	7.9	9.64	9.42	7.17	5.32	3.71	2.41
Vaasa	2.27	2.24	2.98	4.2	5.82	7.94	9.77	9.48	7.51	5.76	4.07	2.78
Oulu	1.68	1.76	2.49	3.71	5.37	7.61	9.54	9.12	6.96	5.06	3.33	2.19
Sodankylä	1.17	1.32	1.94	2.96	4.49	6.76	8.38	7.82	6.28	4.02	2.37	1.41

Ilman keskimääräiset suhteelliset kosteudet  $\phi$  [%] 1961...1990.(RIL 107-2000 Taulukko 1.3)

Paikkakunta	Kuukausi											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Helsinki-Vantaa	88	86	82	74	65	66	72	78	84	86	89	89
Turku	89	87	82	75	66	64	71	76	83	86	89	90
Tampere	86	84	78	71	62	62	69	76	82	83	88	87
Lappeenranta	88	87	82	73	64	65	70	78	84	87	91	90
Joensuu	87	85	82	73	64	65	70	78	84	86	90	89
Jyväskylä	88	87	81	73	64	65	70	80	85	87	91	89
Vaasa	88	87	84	77	69	67	73	79	84	87	90	89
Oulu	86	85	82	74	67	65	70	77	82	85	88	88
Sodankylä	85	84	80	72	66	65	69	77	84	87	89	86

Keskimääräiset sademäärät, mm 1961..1990(RIL-2000 Taulukko 1.6)

Paikkakunta	Kuukausi												vuosi
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Helsinki-Vantaa	41	31	34	37	35	44	73	80	73	73	72	58	649
Turku	45	33	34	38	35	43	78	84	72	69	71	59	662
Tampere	33	23	27	32	36	50	69	74	61	54	50	39	547
Lappeenranta	37	29	33	31	31	50	67	82	71	64	58	50	602
Joensuu	37	29	32	35	36	61	75	84	65	59	54	45	612
Jyväskylä	43	30	35	37	41	56	78	91	67	56	59	47	639
Vaasa	30	22	24	26	33	38	58	68	62	52	49	39	500
Oulu	26	21	23	19	30	43	57	65	48	42	31	28	433
Sodankylä	31	26	25	24	35	56	65	63	55	51	39	31	499

## CLT-levyn kosteudenläpäisyvastus

Kosteudenläpäisyvastus Z eri kosteuspitoisuuksien mukaan, kun levyn paksuus on 80 mm, 100 mm tai 140 mm.

$$\delta_{p,ilma} := 1.85 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \quad \text{Ilman vesihöyrynläpäisevyys (20 °C, normaalipaine)}$$

$$d_1 := 140\text{mm} \quad d_2 := 100\text{mm} \quad d_3 := 80\text{mm} \quad \text{CLT -levyn paksuus}$$

$$\mu := 35 \quad \text{Vesihöyrynvastuskerroin, vaihtelee välillä 20(märkä)...50(kuiva)}$$

$$\delta_p := \frac{\delta_{p,ilma}}{\mu} = 5.286 \times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \quad \text{Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys (20 °C, normaalipaine)}$$

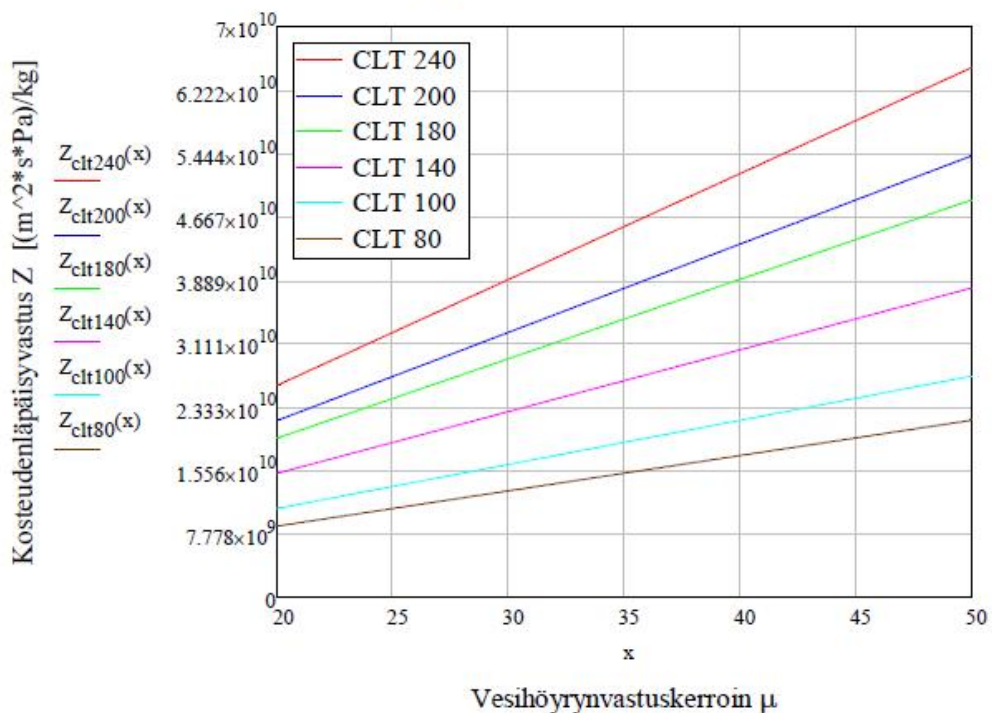
$$Z_1 := \frac{d_1}{\delta_p} = 2.649 \times 10^{10} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} \quad Z_{\text{clt}140(x)} := \frac{d_1}{\delta_{p,ilma} \cdot x}$$

$$Z_2 := \frac{d_2}{\delta_p} = 1.892 \times 10^{10} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} \quad Z_{\text{clt}100(x)} := \frac{d_2}{\delta_{p,ilma} \cdot x} \quad Z_{\text{clt}180(x)} := \frac{d_{180}}{\delta_{p,ilma} \cdot x}$$

$$Z_3 := \frac{d_3}{\delta_p} = 1.514 \times 10^{10} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} \quad Z_{\text{clt}80(x)} := \frac{d_3}{\delta_{p,ilma} \cdot x} \quad Z_{\text{clt}200(x)} := \frac{d_{200}}{\delta_{p,ilma} \cdot x}$$

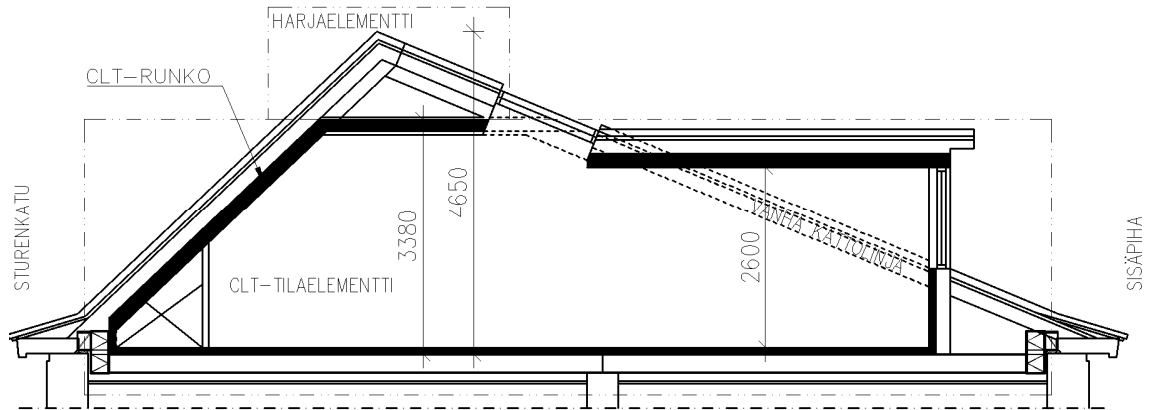
$$Z_{\text{clt}240(x)} := \frac{d_{240}}{\delta_{p,ilma} \cdot x}$$

Eri paksuisten CLT - levyjen kosteudenläpäisyvastuksia Z eri vesihöyrynvastuskertoimen  $\mu$  arvoilla.  $\mu=50$  (kuiva)...  $\mu=20$  (märkä)

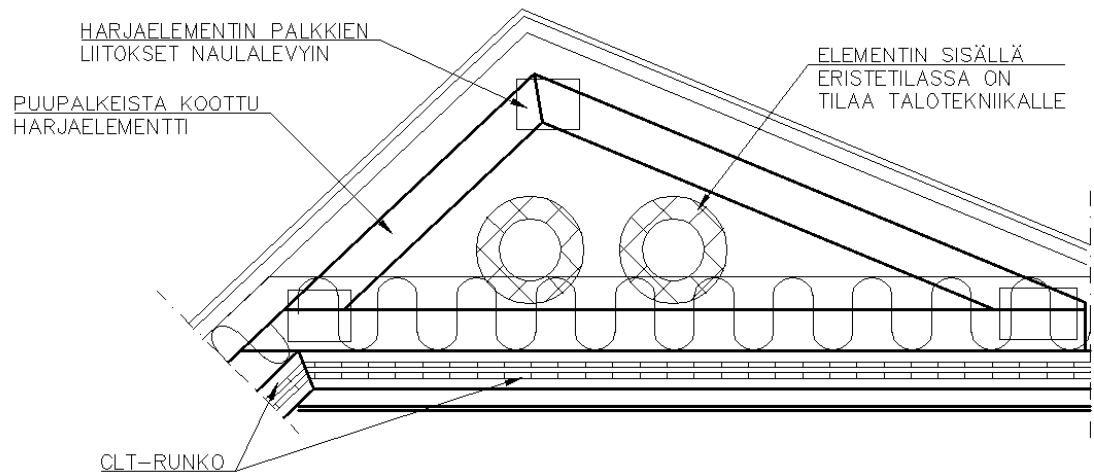


## Sturenkadun mallikohteen ullakon leikkaus

Tilaelementin harja voidaan tehdä erillisestä elementistä, mikäli tilaelementistä tulisi muuten liian korkea. Alemmassa kuvassa harjaelementin lähempi leikkaus.

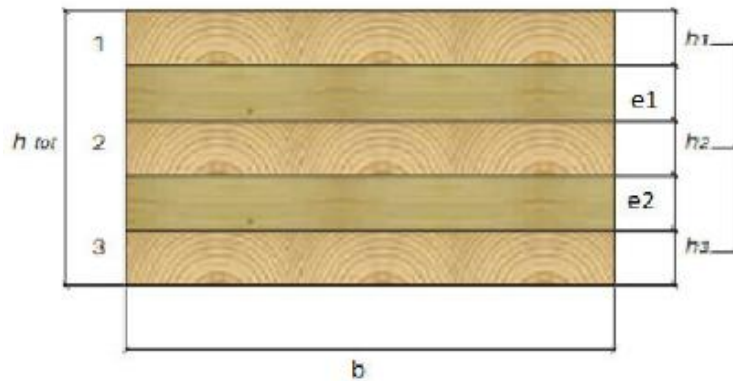


### HARJAELEMENTTI



## CLT-levyn mitoitus

Viisilamellisen CLT-levyn taivutus- ja leikkauslujuuden laskentaesimerkki.



$$b := 1000\text{mm}$$

$$a_1 \quad h_1 := 34\text{mm}$$

$$N.A. \quad h_2 := h_1 = 34\text{mm}$$

$$a_3 \quad h_3 := h_2 = 34\text{mm}$$

$$e_1 := 30\text{mm}$$

$$e_2 := e_1 = 30\text{mm}$$

$$h_{\text{tot}} := 3 \cdot h_1 + 2 \cdot e_1 = 162\text{mm}$$

$$A_{\text{brt}} := b \cdot h_{\text{tot}} = 1.62 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$l_{\text{sv}} := 6000\text{mm} \quad \text{Yksiaukkoinen}$$

KL1, keskipitkä aikaluokka  $k_{\text{mod}} := 0.8$

$$\gamma_M := 1.25$$

$$f_{m,k} := 30\text{MPa} \quad f_{m,d} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 19.2\text{MPa}$$

$$f_{v,k} := 4.0\text{MPa} \quad f_{v,d} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 2.56\text{MPa}$$

$$E_1 := 12000\text{MPa} \quad E_2 := E_1 \quad E_3 := 400\text{MPa}$$

$$G_{R,\text{mean}} := 50\text{MPa} \quad A_{\text{sv}} := b \cdot h_1 = 3.4 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Tehollisen jäykkyyden laskenta

$$EI_{\text{eff}||} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

$$EI_{\text{eff}||} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2) + (E_3 I_3 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2)$$

$$A_1 = A_3$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{b_1 h_1^3}{12}$$

$$a_2 = 0$$

$$a_1 = a_3 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

$$\gamma_1 = \gamma_3 \quad \text{and} \quad \gamma_2 = 1$$

$$EI_{eff \parallel} = E \left[ \left( I_1 + \gamma_1 A_1 a_1^2 \right) + I_2 + \left( I_3 + \gamma_3 A_3 a_3^2 \right) \right]$$

$$EI_{eff \parallel} = EI \left[ \left( 1 + \frac{\gamma A a^2}{I} \right) + (1) + \left( 1 + \frac{\gamma A a^2}{I} \right) \right]$$

$$EI_{eff \parallel} = EI \left[ 3 + \frac{2 \cdot \gamma A a^2}{I} \right]$$

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A}{l^2} \cdot \frac{e_1}{G_{R,mean} \cdot b}} = 0.937$$

$$\gamma_3 := \gamma_1$$

$$\gamma_2 := 1$$

$$a := \frac{h_1}{2} + e_1 + \frac{h_2}{2} = 64 \text{ mm} \quad a_1 := a$$

$$I := \frac{b \cdot h_1^3}{12} = 3.275 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad a_1 := \frac{h_1}{2} + \frac{e_1}{2} = 32 \text{ mm}$$

a) Taivutuslujuus mekaanisesti liitettyjen palkkien teorian mukaan

$$EI_{eff} := E_1 \cdot I \cdot \left( 3 + \frac{2 \cdot \gamma_1 \cdot A \cdot a^2}{I} \right) = 3.25 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{eff} := \frac{EI_{eff}}{E_1} = 2.708 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

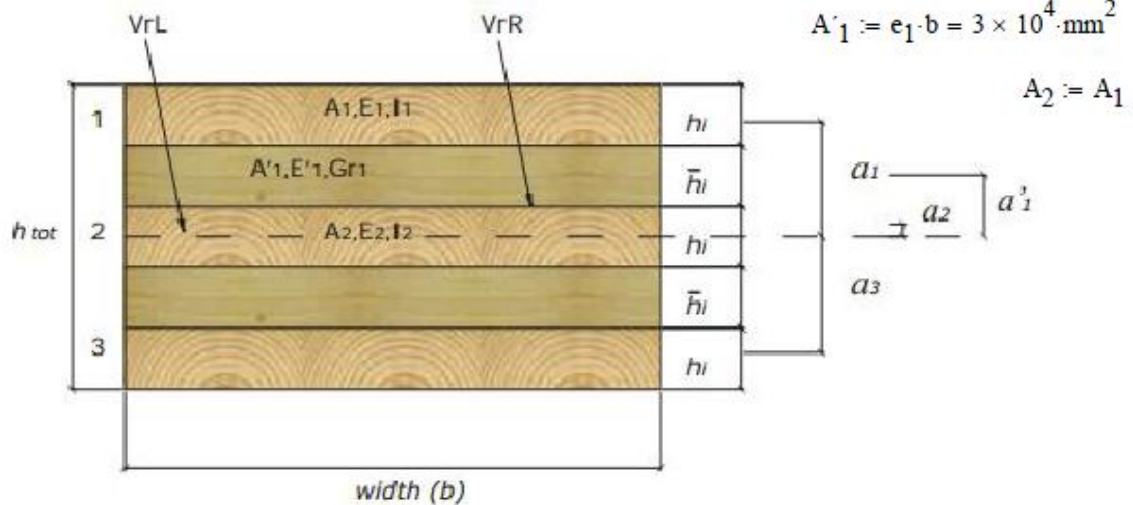
Taivutuslujuus

$$M_{r,a} := f_{m,d} \cdot \frac{I_{\text{eff}}}{\gamma_1 \cdot a + 0.5 \cdot h_1} = 67.555 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

b) Taivutuslujuus yksinkertaistetun menetelmän mukaan

$$M_{r,b} := f_{m,d} \cdot \frac{I_{\text{eff}}}{0.5 \cdot h_{\text{tot}}} = 64.198 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \Rightarrow M_{r,a} \sim M_{r,b}$$

Leikkauskestävyys:



Materiaalin leikkauskestävyys

$$(EQ) := \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 + E'_1 \cdot A'_1 \cdot a'_1 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot \frac{A_2}{2} \cdot \frac{h_2}{4} = 2.659 \times 10^4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{rL} := \frac{f_{v,d} \cdot EI_{\text{eff}} \cdot b}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 + E'_1 \cdot A'_1 \cdot a'_1 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot \frac{A_2}{2} \cdot \frac{h_2}{4}} = 312.93 \cdot \text{kN}$$

Keskimmäisen lamellin ja sen viereisen lamellin välisen liimasauman tasoleikkausjännitys:

$$V_{rR} := \frac{f_{v,d} \cdot EI_{\text{eff}} \cdot b}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot \left(a_1 - \frac{h_2}{2}\right) + E'_1 \cdot A'_1 \cdot \left(a'_1 - \frac{h_2}{2}\right)} = 458.409 \cdot \text{kN}$$

Lopullinen leikkausvoiman kestävyys on tällöin:

$$V_{r,d} := \min(V_{rL}, V_{rR}) = 312.93 \cdot \text{kN}$$

Leikkausjännitys tavallisen tavallisella kaavalla:

$$\tau_1 := \frac{1.5 \cdot V_{r,d}}{A_{brt}} = 2.897 \text{ MPa}$$

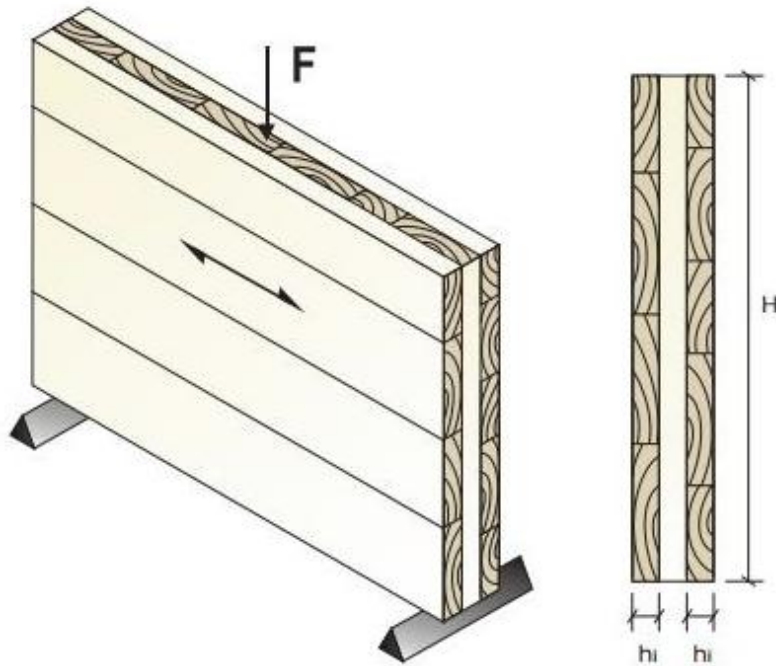
Leikkausjännitys mekaanisin liittimin koottujen palkkien laskentateorian mukaan:

$$\tau_2 := \frac{V_{r,d} \cdot (EQ)}{EI_{eff} b} = 2.56 \text{ MPa}$$

## CLT-palkin mitoitus

Kolmelamellisen CLT-levyn taivutuslujuuden laskentaesimerkki.

CLT -palkin taivutuskestävyyden laskenta



$$\underline{H} := 1000\text{mm} \quad h_{\text{tot}} := 94\text{mm} \quad h_i := 30\text{mm} \quad h_{\text{eff}} := 2 \cdot h_i$$

Pituussuuntaisten lamellien materiaaliominaisuudet, C24:

$$E_0 := 11000\text{MPa} \quad E_{90} := 370\text{MPa}$$

$$G_0 := 690\text{MPa} \quad G_R := 60\text{MPa}$$

$$f_{m,k} := 24\text{MPa} \quad k_{\text{mod}} := 0.8 \quad \gamma_M := 1.25$$

$$f_{m,d} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 15.36\text{MPa}$$

Taivutuskestävyyden laskentaan otetaan mukaan vain kantassa suunnassa pitkittäin olevat lamellit, joten tehollinen jäyhyysmomentti on tällöin:

$$I_{\text{eff}} := \frac{h_{\text{eff}} H^3}{12} = 5 \times 10^9 \text{mm}^4$$

Palkki kestää taivuttavaa momenttia tällöin:

$$M_R := f_{m,d} \frac{I_{\text{eff}}}{0.5H} = 153.6\text{kN}\cdot\text{m}$$

## CLT-seinän mitoitus

Kolmelamellisen CLT-seinälevyn laskentaesimerkki.

### CLT -seinän mitoitus

Seinän materiaaliarvot ja dimensiot Liitteen 7 CLT -levyn mukaan korkeutta  $l_0$  lukuunottamatta.

$$l_0 := 3000\text{mm} \quad b := 1\text{m} \quad \text{Tarkasteltavan alueen leveys}$$

$$h_{\text{tot}} := 94\text{mm} \quad h_1 := 30\text{mm} \quad h_{\text{eff}} := 2 \cdot h_1 \quad e_1 := h_{\text{tot}} - 2 \cdot h_1 = 34\text{mm}$$

$$\frac{A_{\text{tot}}}{b} := b \cdot h_1 = 3 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Pituussuuntaisten lamellien materiaaliominaisuudet, C24:

$$E_0 := 11000\text{MPa} \quad E_{90} := 370\text{MPa} \quad E_{0.05} := 7400\text{MPa} \quad k_{\text{mod}} := 0.8 \quad \gamma_M := 1.25$$

$$G_0 := 690\text{MPa} \quad G_R := 60\text{MPa} \quad \beta_c := 0.1 \quad \text{RIL 205-1-2009 CLT päivitykset}$$

$$f_{c,0,k} := 21\text{MPa}$$

$$f_{c,0,d} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 13.44\text{MPa}$$

Hoikkuuden laskenta:

$$l_{\text{eff}} := 1.0 \cdot l_0 = 3\text{m}$$

$$A_{\text{tot}} := b \cdot h_{\text{tot}} = 9.4 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$I := \frac{b \cdot h_1^3}{12}$$

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_0 \cdot A}{l_0^2} \cdot \frac{e_1}{G_R \cdot b}} = 0.83$$

$$a := \frac{e_1}{2} + \frac{h_1}{2} = 32\text{mm} \quad \text{Uloimman lamellin painopisteen etäisyys koko CLT-levyn painopisteestä}$$

$$EI_{\text{eff}} := E_0 \cdot I \left( 3 + \frac{2 \cdot \gamma_1 \cdot A \cdot a^2}{I} \right) = 6.351 \times 10^{11} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{\text{eff}} := \frac{EI_{\text{eff}}}{E_0} = 5.773 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

$$\lambda_{\text{eff}} := l_{\text{eff}} \sqrt{\frac{A_{\text{tot}}}{I_{\text{eff}}}} = 121.051$$

Tästä eteenpäin mitoitus EN 1995-1 luvun 6.3.2 mukaan.

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_{eff}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 2.053$$

$$k_y := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] = 2.694$$

$$k_{c,y} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0.225$$

Eli seinän nurjahdus tässä esimerkissä pienentää pystykuorman kestävyttä kertoimella  $k_{c,y} = 0.225$

Tässä ei kuitenkaan otettu lainkaan huomioon mahdollisia vaakakuormia. Todellisessa seinän mitoituksessa myös vaakakuormat vaikuttavat seinän kestävyteen. Ne tulee ottaa huomioon Eurokoodin EN 1995-1 luvun 6.3.2 kaavojen 6.23 ja 6.24 mukaisesti.

Seinän mitoituksessa kuomien suunnan kanssa samassa syysuunnassa olevat lamellit kantavat suuremman osan kuormasta kuin kuorman suuntaa kohtisuoraan olevat. Kuorman jakautuminen voidaan laskea eri suuntaisten lamellien suhteen, mutta yksinkertaisesti laskettuna ollaan vammalla puolella, jos vain kuorman suunnan kanssa samassa suunnassa olevat lamellit lasketaan kantamaan kaikki kuorma.

Esimerkiksi seinässä, jossa kaikki lamellit ovat yhtä pitkiä, jakautuu kuormat kimmokerrointen ja pinta-alojen suhteen. Tällön tässä esimerkissä pystylamellit keräävät kuormasta

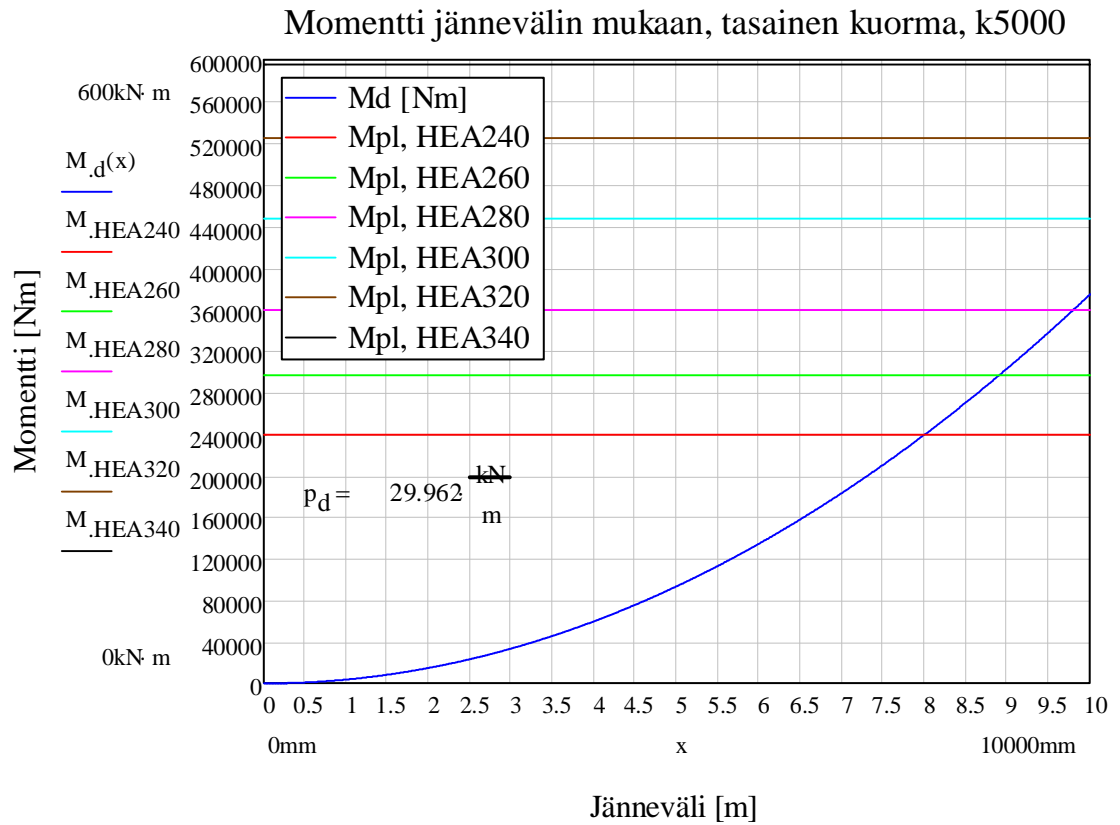
$$\frac{2 \cdot h_1 \cdot b \cdot E_0}{2 \cdot h_1 \cdot b \cdot E_0 + e_1 \cdot b \cdot E_{g0}} = 0.981 \quad \text{Eli } 98 \%$$

Seinä kestää siis pystykuormaa:

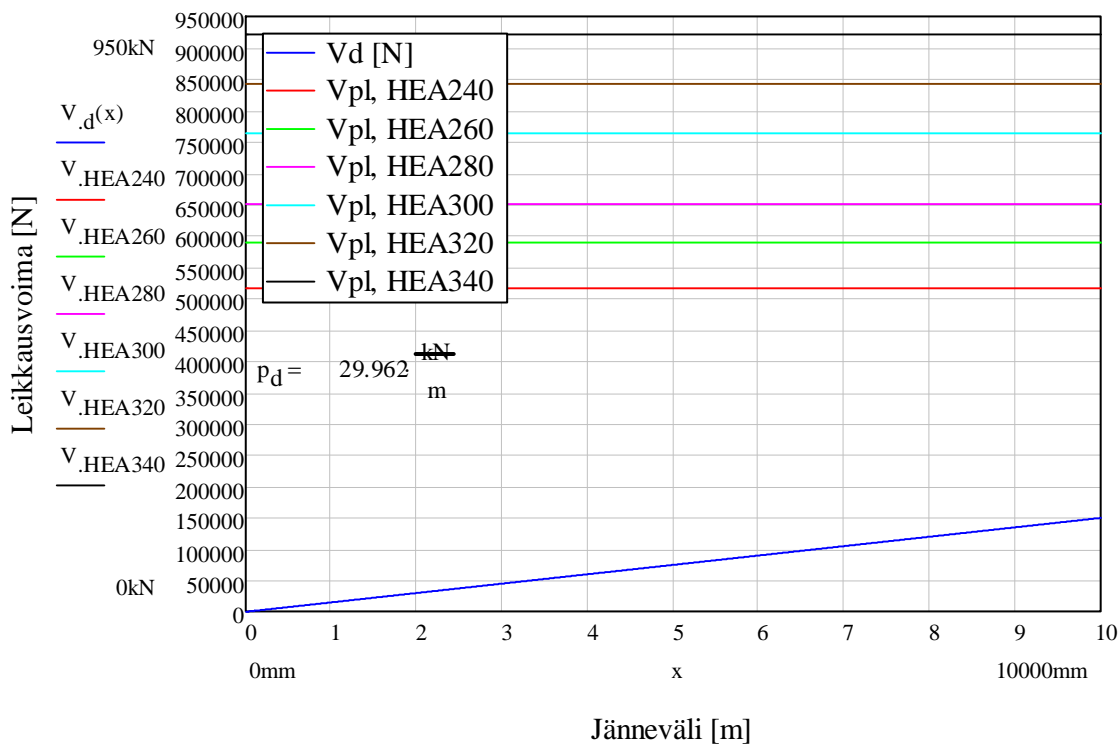
$$f_{c,r} := f_{c,0,d} \cdot 2 \cdot h_1 \cdot b = 806.4 \text{ kN} \quad \text{kun tarkasteltavan leveytenä on 1 m.}$$

## Välipohjan uudet teräspalkit

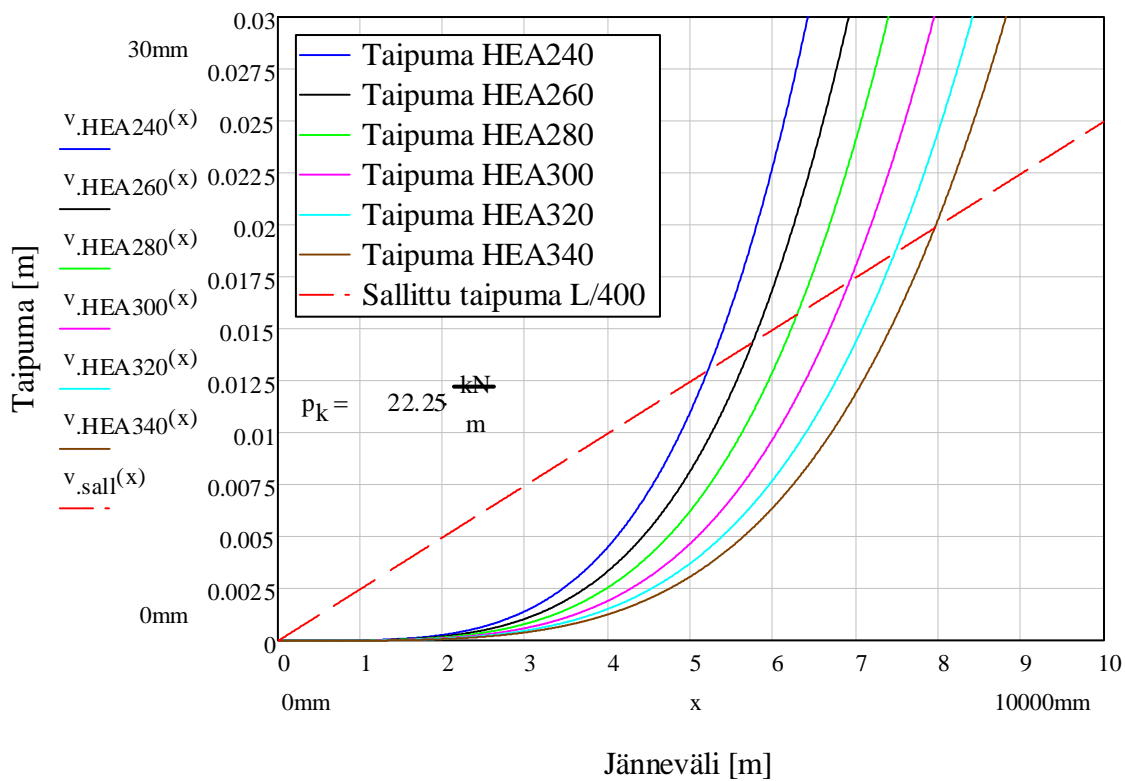
Välipohjan uusien teräspalkkien alustavaa mitoitusnopeuttavat teräspalkkikuvaajat.



Leikkausvoima jännevälin mukaan, tasainen kuorma, k5000



Palkkien taipumat jännevälin muuttujana, k5000



## CLT-palokatkoeholkin leikkauspiirustus

Sewatek:n valmistama CLT palokatkoeholkki, joka voidaan asentaa jälkeinpäin tai jo elementtitehtaalla.

